

以避免严重的微波损耗和微波反射问题。

在过渡热沉上常用的微波平板介质波导有微带传输线和共面波导传输线。在文献报道中的 40 Gb/s 高速 EA 调制器中,两种微波传输线都采用过。相比而言,共面波导传输线在结构和制作工艺上更为简单,而且对于管芯级测试,更便于热沉和微波探针的配合连接。因此,本论文采用共面波导传输线实现微波信号的馈送。

微波信号通过微波传输线传递到终端,再通过引线连接传递到高速光电子器件上,如高速激光器和 EA 调制器。对于 EA 调制器而言,为了减小微波反射,必须并联一个负载电阻以实现阻抗匹配。为此,本论文制作 $50\ \Omega$ 氮化钽(Ta_2N)薄膜电阻并联在微波传输线终端。所以采用 Ta_2N 薄膜电阻,是因为 Ta_2N 薄膜电阻具有良好的温度稳定性和高频稳定性^[89-91]。

5.1.2 高速过渡热沉的技术难点分析

图 5-1 所示的是我们研制的高速过渡热沉的结构示意图。图(a)所示是顶视图,热沉的微波电路包括一个 CPW 传输线用于微波信号传送, Ta_2N 薄膜电阻用于终端的阻抗匹配;图(b)是 CPW 传输线的截面图,金属电极厚度为 t ,信号线电极宽度为 W ,地电极宽度为 W_G ,两者之间的间距为 S 。

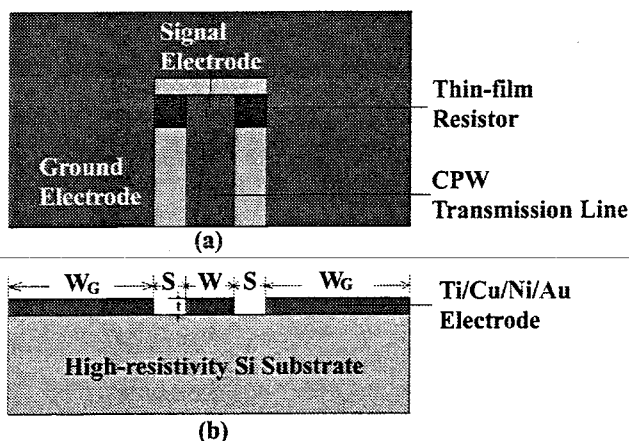


图 5-1 高速过渡热沉的结构示意图

制作热沉需要解决的第一个问题是选择何种材料作为热沉基底。本论文选用两种材料作为热沉基底: Al_2O_3 陶瓷和高阻硅衬底。 Al_2O_3 陶瓷是一种

常用的微波电路基底材料,其优点是微波损耗低、材料价格低,缺点是散热特性差,一般用于制作EA调制器等发热量较小的器件的过渡热沉。

和常用的过渡热沉材料,如金刚石、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,由于传统硅材料的电阻率低,在硅上制作微波电路损耗严重。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_2 、聚酰亚胺等,但是这样的制作工艺复杂,成本增加,同时破坏了硅材料良好的散热特性。高阻硅衬底是一种新型微波热沉材料,跟传统硅基材料相比,其电阻率高($> 1 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$)、微波损耗低。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,其次是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,则可进一步地降低封装成本。近年来已有基于高阻硅基衬底的低损耗共面波导传输线的文献报道,但至今尚未见到硅基过渡热沉的研究报道。本文针对40 Gb/s高速光电子器件的封装要求,提出并实现基于高阻硅材料的新型低成本、宽带过渡热沉。

制作共面波导传输线之前,首先需要对微波传输线结构参数进行优化设计,以期获得特征阻抗匹配、传输损耗低的微波特性。传输线结构设计的一个问题是传输线地电极宽度选取,过小则损耗严重,过大则浪费面积。一种研究方案是采用有限宽地电极的模型来设计传输线,但是其缺点是模型复杂、计算量大;另外一个研究方案是采用理论设计与实验相结合的方法,即设计的时候假设地线宽度为无穷大,可利用普通共面波导模型快速优化设计出其他结构参数,加上变化的地电极宽度参数,制作出一系列共面波导传输线,根据微波传输特性变化规律即可获得合适的地线电极宽度。

研制高速热沉的另外一个问题是选择合适的电极材料,以实现与薄膜电阻的良好接触。我们发现,采用某些常用的金属电极材料(如Cr/Au)制作出的微波热沉的微波特性比较反常,在5 GHz以下的低频部分反射特性急剧恶化,同时测得其直流匹配电阻高达 100Ω 以上。经过文献调研^[92]和实验比较,我们找到原因:高温下Cr/Au之间发生严重扩散形成高阻材料,加上扩散到表面的Cr被氧化为 Cr_2O_3 ,导致薄膜电阻率增加,从而使匹配

电阻值增加。由于热沉制作工艺和后续封焊过程中高温加热不可避免，因此这种二元金属材料不宜用作高速热沉的电极材料。

制作工艺方面的难点在于实现厚电极，以满足低传输损耗的要求。为封装焊接金线的需要，电极最上面一层为金，且占据绝大部分厚度。通常采用电镀的方法制作厚金电极，与热蒸发方式相比可有效节约金属原料。实现低损耗微波波导需要电极表面光滑平整，给电镀工艺的要求很高。另外一个难点问题在于提高电极的附着力，避免金线焊接的时候电极薄膜从热沉表面被剥离。因此需要仔细研究影响电极附着力的各方面因素，研究通过改进工艺技术提高电极附着力的方法。

5.2 设计共面波导传输线实现低损耗微波传输

首先我们进行共面波导传输线的结构设计。为了简化模型，减少计算量，提高优化设计速度，设计中假设地线宽度为无穷大。采用 Applied Wave Research 公司的 Microwave Office 2002 软件用于共面波导传输线的模拟计算。因为该软件带有共面波导传输线的模块，可以快速得到不同结构参数的共面波导微波特性，从而大大简化优化设计的工作量。

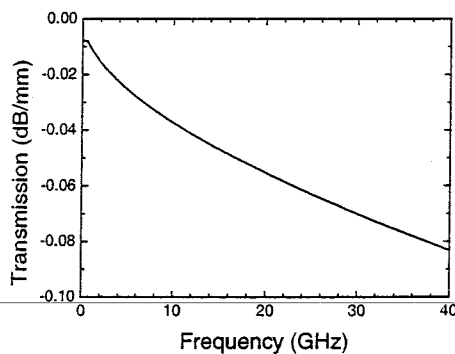


图 5-2 CPW 传输线的传输系数

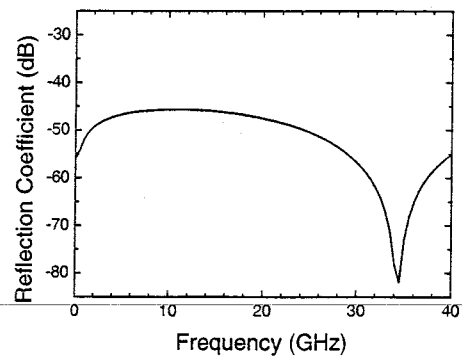


图 5-3 CPW 传输线的反射系数

传输线金属电极的厚度不能太薄，但也不宜太厚，如果电极过厚将导致电镀时间过长而电镀质量下降。考虑到制作工艺的具体情况，金属电极的厚度 t 在设计中固定为 $2\ \mu\text{m}$ 。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 $54\ \mu\text{m}$ 。图 5-2 所示的是 CPW 传输线的损耗系数与微波频率的关系曲线,从 0~40 GHz,微波传输的传输损耗小于 $0.08\ \text{dB/mm}$ 。图 5-3 所示的反射系数反映了 CPW 传输线的阻抗匹配情况,反射系数越低,则阻抗越匹配,从 0~40 GHz,微波反射系数小于 $-45\ \text{dB}$ 。

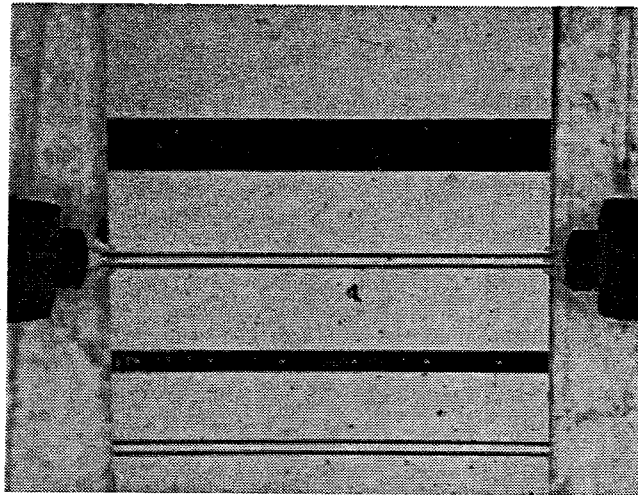


图 5-4 Si 基 CPW 传输线微波特性的测试照片,两端是共面波导型微波探针

根据设计的结构参数,我们在热沉衬底上制作了一系列 CPW 传输线,地线宽度从 $300\ \mu\text{m}$ 以 $200\ \mu\text{m}$ 间隔递增到 $1100\ \mu\text{m}$,制作工艺将在后面详细介绍。图 5-4 所示是对 CPW 传输线的测试照片,测试中采用 Agilent 8722 网络分析仪和两个 Cascade ACP40-GSG 微波探针。

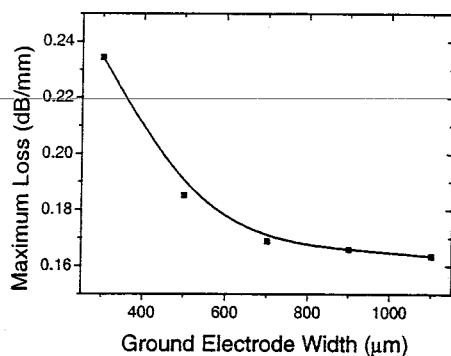


图 5-5 高阻 Si 基 CPW 传输线损耗特性与地电极宽度的关系

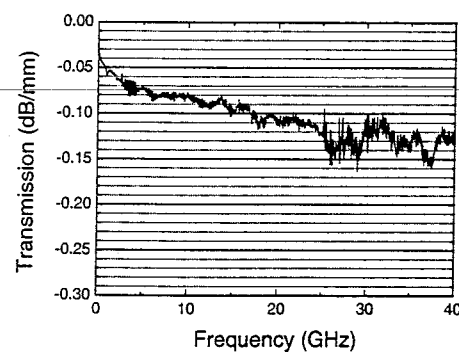


图 5-6 高阻硅基 CPW 传输线的典型传输损耗曲线

图 5-5 所示的是这些传输线在 0~40 GHz 范围内的传输损耗最大值, 随着地电极宽度的增加, 损耗迅速降低, 当电极宽度大于 700 μm 之后, 损耗就都低于 0.17 dB/mm。图 5-6 所示的是一个 6 mm 长的高阻硅基共面波导传输线的典型传输损耗, 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 5-6 表明, 我们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 的低损耗微波传输线。

5.3 选择合适金属材料改善电极与 Ta_2N 薄膜之间接触特性

CPW 传输线与 Ta_2N 薄膜电阻之间的良好接触特性对于保证阻抗匹配非常重要。图 5-7 所示的是采用常用的金属电极材料 Cr/Au 电极制作出的微波热沉的反射系数, 在微波频率小于 5 GHz 的部分出现严重的恶化现象, 测得匹配电阻值为 100 Ω 以上。通过多次实验发现, 这个现象与制作工艺中的高温退火工艺有关, 匹配电阻在未经退火工艺之前约为 60 Ω , 经过 300 $^\circ\text{C}$ 退火仅 3 分钟之后, 电阻值就上升到 75 Ω 。直流电阻值的上升恰好和低频部分反射特性的恶化现象相吻合。

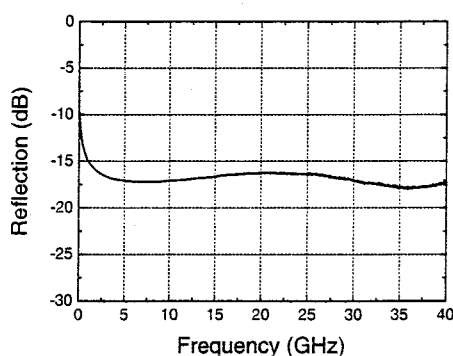


图 5-7 经过 300 $^\circ\text{C}$ 退火处理后的微波热沉反射系数, 低频部分严重恶化

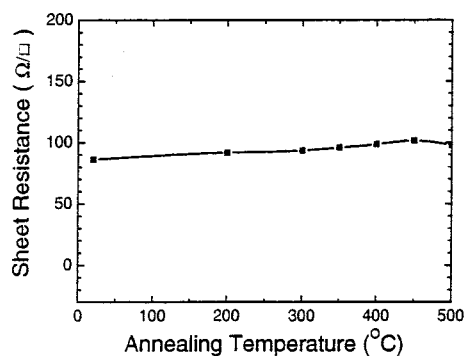


图 5-8 Ta_2N 薄膜方块电阻测量值与退火处理温度的关系

由于高温加热在制作工艺和后续热沉封装中不可避免, 因此必须找到导致热沉性能恶化的根本原因才能解决问题。

我们首先排除掉了 Ta_2N 薄膜电阻本身的怀疑。图 5-8 所示的是 Ta_2N 薄膜经过不同退火温度下处理 3 分钟之后的薄膜方块电阻。结果证明, Ta_2N

薄膜的电阻率基本上没有受到高温加热的影响,因此热沉性能的恶化应该是与电极材料有关。

通过查阅有关薄膜金属电极的文献^[89,92,93],我们发现 Cr/Au、Ti/Au 等二元金属薄膜在高温条件下容易发生互扩散形成高阻材料,加上扩散到表面的 Cr 被氧化为 Cr_2O_3 ,同时这种氧化又加速 Cr 与 Au 的扩散,从而导致使金属电极与 Ta_2N 薄膜之间的接触电阻升高,如图 5-9 所示,退火温度越高,电阻率上升越快^[92]。

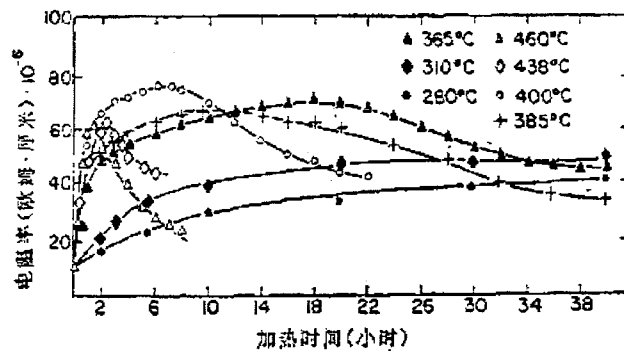


图 5-9 高温加热条件下 Cr/Au 材料电阻率与加热时间的关系^[92]

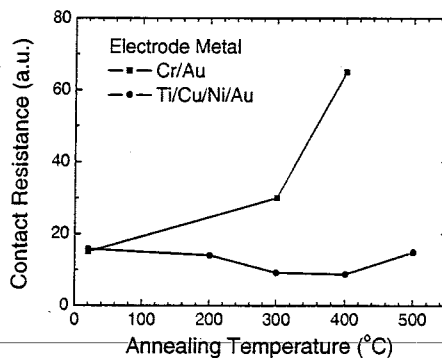


图 5-10 不同退火条件下的 Cr/Au 和 Ti/Cu/Ni/Au 与薄膜电阻的接触电阻比较

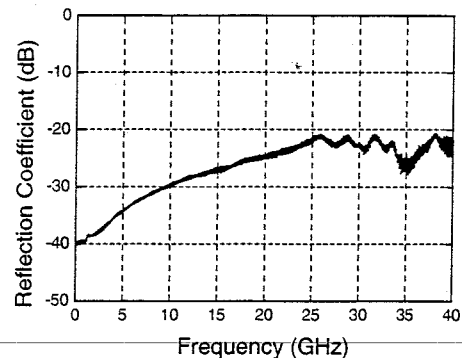


图 5-11 采用 Ti/Cu/Ni/Au 作为电极的高速热沉的微波反射系数特性

文献^[93-95]推荐一种 Ti/Cu/Ni/Au 多层金属电极作为集成电路电极,其特点是采用 Cu/Ni 代替铂(Pt),钼(Pb)等贵金属作为扩散阻挡层,阻止 Ti 和 Au 之间的扩散。我们采用 Ti/Cu/Ni/Au 金属材料用作过渡热沉的金属电极

材料,从而保证金属电极的热稳定性,使电极与 Ta_2N 薄膜之间的接触电阻的温度稳定性大大增强。图 5-10 对比采用 Cr/Au、Ti/Cu/Ni/Au 两种金属作为电极与 Ta_2N 薄膜之间的接触电阻与退火温度的关系曲线,采用 Cr/Au 电极后接触电阻在退火后急剧上升,而采用 Ti/Cu/Ni/Au 作为电极接触电阻直到 500°C 仍保持稳定。图 5-11 是采用 Ti/Cu/Ni/Au 作为 CPW 传输线电极制作的过渡热沉的反射系数特性,低频端的反射特性恶化问题已完全消除,而直到 40 GHz 的反射系数仍然小于 -20 dB。

5.4 高速热沉的制作工艺流程

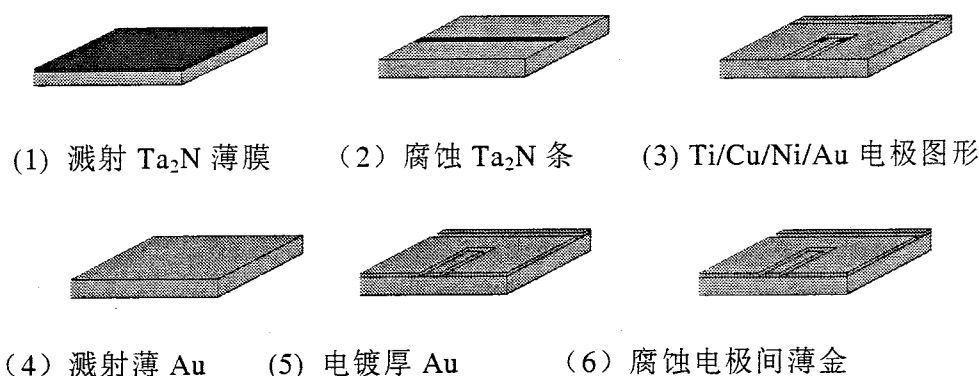


图 5-12 高速热沉的制作工艺流程图

图 5-12 介绍的是我们制作高速热沉的工艺流程,主要分为六个步骤:

1、溅射 Ta_2N 电阻薄膜。氮化钽薄膜的性质和结构密切依赖于溅射方式和工艺参数。通常希望用于电阻的薄膜具有接近于零的低电阻温度系数,此时为六方密堆积结构(hexagonal close-packed, hcp)的 Ta_2N 材料,这是一种稳定的结构,其电阻率一般为 $250 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ 。通过控制溅射薄膜厚度,使之方阻(sheet resistance)控制在约 $100 \Omega/\square$,厚度约为 25 nm。

由于本实验室尚无条件制作 Ta_2N 薄膜,我们是通过外协加工的方式完成 Ta_2N 薄膜的溅射工艺的。

2、腐蚀 Ta_2N 电阻薄膜条。可通过调制 Ta_2N 薄膜条的宽度来实现 50Ω 左右的匹配电阻。由于采用对称结构的共面波导,匹配电阻也设计成对称

结构,即在传输线终端的信号线两侧并联相同的薄膜电阻。 Ta_2N 材料与金属电极之间存在一定的接触电阻,制作 Ta_2N 薄膜的条宽要比直接通过 Ta_2N 方阻得到的宽度稍大一些才行。

Ta_2N 电阻薄膜条是通过湿法腐蚀的方式制作的,腐蚀掩膜直接采用光刻胶。由于其它腐蚀液对 Ta_2N 难以腐蚀, Ta_2N 薄膜的腐蚀一般都采用氟硝酸(1:3-HF: HNO_3),但因为其腐蚀速率极快,容易因侧蚀严重造成边缘不规则的现象。为此,我们决定摸索稀释的氟硝酸腐蚀工艺,使侧蚀现象从难以控制变成可以控制的问题。氟硝酸经过稀释后,腐蚀速率大为降低,侧蚀问题得以控制。我们采用稀释氟硝酸(4:4:3-HF: HNO_3 : H_2O)成功实现出边缘整齐的 Ta_2N 条,时间约12秒。

3、制作Ti/Cu/Ni/Au图形电极,使共面波导的信号电极和 Ta_2N 电阻薄膜相接。Ti/Cu/Ni/Au多层金属的腐蚀是一个难点,尽管我们摸索出一套有效的腐蚀方法,但是其缺点是工艺复杂、有侧蚀问题,对金属材料的附着力有不利的影 响。而采用抬离(lift off)的方式制作图形电极,则可不仅避免侧蚀问题,而且简化制作工艺和难度。

Ti/Cu/Ni/Au电极薄膜可以通过热蒸发或者溅射的方法沉积。由于Ti和Ni的熔点高,需要加热灯丝提供很大的电流以产生很大的热量,被沉积的基片也等于被灯丝加热升温,因此不利于实现光刻胶抬离工艺。而采用金属溅射方式,则可避免高温加热。

因此我们在光刻胶图形上溅射Ti/Cu/Ni/Au膜。溅射前,采用AZ5214E光刻胶制作出图形,只将在传输线电极区域露出基底。溅射的Ti/Cu/Ni/Au金属各层厚度分别是50 nm、200 nm、100 nm和60nm,溅射时的基片加热温度控制在 80°C ,以适当增加材料附着力,同时又避免因温度过高光刻胶固化而抬离困难。溅射电极后,再将传输线电极之间的金属抬离去掉。

4、溅射50 nm的Au膜用作电镀的种子层。此层金膜是为下一步电镀共面波导传输线厚Au电极的导电而制作的。

5、电镀厚Au传输线电极。为减小微波传输线的损耗,电极厚度必须达到一定的厚度。我们设计的电极厚度为 $2\text{ }\mu\text{m}$,因此采用电镀工艺制作是

比较明智的选择。金属电极的表面应保证一定的光亮度,以避免严重的微波散射损耗。同时,应该采用毒性较低的电镀液以避免危害人身安全。

我们采用基于柠檬酸盐的微氰酸性镀金液,其中采用氰化亚金钾($\text{K}[\text{Au}(\text{CN})_2]$,俗称金盐)作为主盐,采用柠檬酸铵和柠檬酸增强导电性并提供弱酸性环境,采用酒石酸锑钾作为电镀光亮剂。由于镀金液中氰化物比例小、始终呈酸性环境,因此比较安全。

镀金电流密度约为 0.07 A/dm^2 ,电镀速率为 $3 \mu\text{m/h}$ 。电镀前先制作光刻胶掩膜,盖住不需要电镀的部分。为实现 $2 \mu\text{m}$ 左右的电镀厚度,我们采用 BP-300cp 厚型光刻胶,后烘后光刻胶厚约 $6 \mu\text{m}$ 。

6、腐蚀共面波导电极间的薄 Au 种子层。由于种子层厚度很小,因而可以很容易地将其快速去掉,避免造成对电镀金电极的过度腐蚀。我们采用稀释的腐蚀液($\text{I}_2:\text{KI}:\text{H}_2\text{O}=1:1:28$)进行腐蚀,腐蚀时间约 8 s。

通过上述过程,带有高速微波传输线和匹配电阻的过渡热沉就制作完成,再经过划片将整个片子分为独立的热沉小单元。

5.5 高速热沉的微波特性测试与分析讨论

为了评价高速热沉,需要对其微波特性进行测试,并对其关键特征参数进行评估,还需要进一步应用于器件的管芯级封装、测试中,对其实用性进行验证。

热沉制作完毕之后,我们采用网络分析仪和共面微波探针对其微波反射特性进行测量。图 5-13 所示的是一个高阻硅基热沉的典型反射系数曲线,包括测量值和根据等效电路拟和的计算值。由于热沉上传输线的微波损耗很小,其微波反射特性将主要反映其匹配电阻的微波特性,图 5-13 的小图为热沉热沉的等效电路,其中电阻 R_L 代表匹配电阻的电阻值, C_{PL} 代表热沉上的杂散电容。根据拟和结果,匹配电阻和杂散电容分别为 48Ω 和 0.015 pF 。

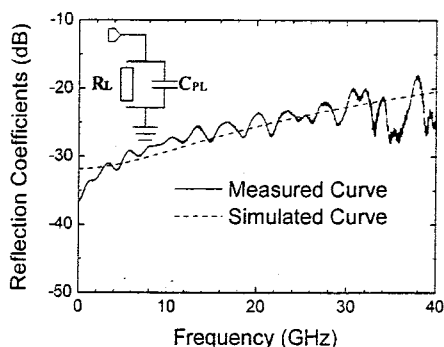


图 5-13 硅基高速热沉的反射系数的测量值与计算值

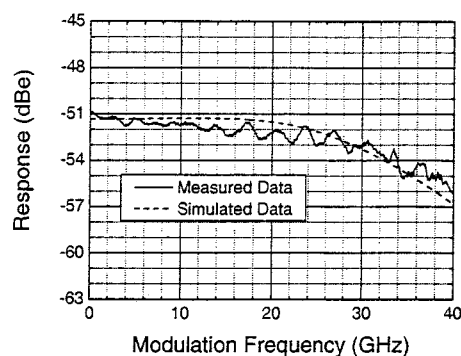


图 5-14 采用高阻硅基热沉的 EA 调制器小信号调制响应曲线

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。为验证其实用性，我们利用此热沉对高速电吸收调制器进行管芯级封装测试。图 5-14 所示的是小信号调制特性曲线，其中虚线部分的拟和数据曲线根据等效电路计算得到，实线是校准后的测试曲线。数据表明，调制器的 3 dB 小信号调制带宽大于 33 GHz，结果证明新型 Si 基热沉非常适用于高速光电子器件的封装。

5.6 本章小结

本章研制可用于 40 Gb/s 高速 EA 调制器及其集成器件的高速热沉。引入高阻硅基衬底作为过渡热沉基底，提出并实现了一种用于 40 Gb/s 高速光电子器件的新型高速过渡热沉。CPW 微波传输线用于实现低损耗微波传送，采用 Ta₂N 薄膜电阻实现光电子器件的阻抗匹配。

为了实现低损耗的微波传输特性，CPW 传输线的结构尺寸经过了理论设计和实验优化，在高阻硅基衬底上的 CPW 传输损耗达到 0~40 GHz 范围内低于 0.165 dB/mm。

我们发现金属电极选择不当会造成阻抗失配，在低频部分出现反射系数恶化。通过文献调研和实验验证，我们通过采用具有扩散隔离层的多层金属材料 Ti/Cu/Ni/Au 作为 CPW 电极材料，成功实现与 Ta₂N 的稳定低阻连接。

开发出一整套制作可用于高速 EA 调制器及其集成器件的热沉制作工艺,并制作出具有低反射系数的高速热沉,在 0~40 GHz 范围内反射系数都小于-20 dB,从而为高速 EA 调制器高速特性的实现奠定了坚实基础。

第六章 高速集成光源的管芯级封装、测试技术研究

本章的任务是研究管芯级封装、测试技术,对于最终实现并测试出 EA 调制器及其集成器件的高频调制特性,有着很重要的意义。管芯级封装技术必须解决减小引线电感的问题,以及避免引入大的寄生参数。测试技术需要研究的主要问题是实现低损耗光纤耦合,校准测试误差,获取器件的特征参数提供反馈。

6.1 集成光源的管芯级封装、高频测试的技术难点分析

制作完集成光源器件和高速热沉之后,必须将高速光源器件进行封装才能进行测试。本论文采用最简单的管芯级封装,然后通过高频测试对器件进行评测。

管芯级封装,就是将光电子器件焊接到高速热沉上,然后将器件焊盘与热沉上的微波电路进行引线连接,其主要任务是减小引线电感并提高成品率。管芯焊接的主要难点在于需要比较准确控制管芯的位置,以保证尽量减小金线长度引起的电感,又要有足够的空间避免焊料流到热沉上 CPW 传输线区域。金线焊接的难点在于要确保金球能够打上器件焊盘,对于球焊的力量要求比较苛刻,难度比较大。

对 40 Gb/s 高速集成光源进行高频测试、评价的主要难点包括:建立低损耗的双端光纤耦合系统,消除测试误差以获得准确的器件特性,通过分析测试结果获取器件关键特征参数。

测试 40 Gb/s SOA/EA 调制器集成器件需要进行双端光纤耦合,比 DFB/EA 调制器器件测试的难度要大得多。双端光纤耦合的首要难点在于将可调谐激光器光源的激光有效耦合到集成器件中,进一步的难题是实现低耦合损耗以满足 40 Gb/s 器件的测试光功率要求。

在对高速集成光源的管芯级测试系统中,微波是通过微波探针传送到高速过渡热沉上的,而系统的微波校准只能扣除到微波探针入端接头,因此

微波探针本身会引入一定的微波损耗，造成测试误差。另外，高速探测器的频率响应也是不平坦的，也会对小信号频率响应引入一定的误差。因此，必须选择有效的方法消除测试误差以获取准确的器件特性。

获得小信号调制特性和微波反射特性之后，就需要通过对这些数据的分析得到集成光源器件的关键特征参数，从而对管芯结构、高速热沉和管芯级封装等环节提供反馈以便有的放矢地加以改进。因此必须通过对集成光源器件的分析，得到比较准确的等效电路，从而对器件的高频特性实现有效仿真。

6.2 基于导电银胶的管芯级封装，减小引线电感、提高成品率

为在管芯级封装工艺中减小引线电感并提高成品率，本论文自主开发一套基于导电银胶的管芯级封装技术。我们采用导电银胶代替传统金属焊料进行管芯焊接，避免焊料电极制作的复杂过程，而且无需采用专用焊接设备^[96]。焊接前可准确控制管芯位置，焊接后器件与热沉的电连接特性良好。本论文采用导电银胶连接引线的方法，既有效减小引线长度，又避免因焊盘尺寸较小而将焊盘、管芯打坏的问题。

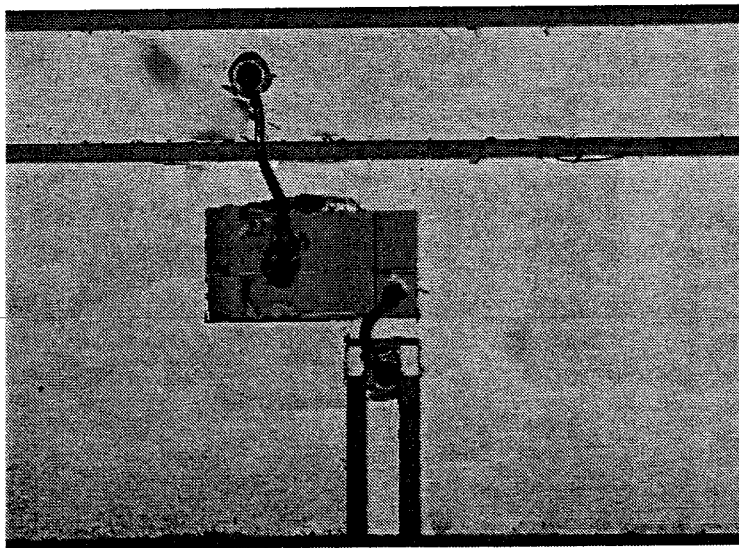


图 6-1 管芯级封装的高速 SOA/EA 调制器集成器件照片

图 6-1 所示是我们采用导电银胶工艺成功装焊的一个 SOA/EA 调制器集

成器件。器件管芯位于高速热沉的中间,其左边部分是约 $400\text{ }\mu\text{m}$ 长的 SOA,其右边部分是长度为 $70\text{ }\mu\text{m}$ 的 EA 调制器。集成器件通过导电银胶正面朝上焊接到 Al_2O_3 热沉上,其位置经过调节,保证 EA 调制器尽量靠近热沉上的共面波导传输线,同时又要给打金线的劈尖留出空间。EA 调制器的焊盘和共面波导传输线是用金线连接起来的,共面波导传输线一端采用超声球焊,而 EA 调制器一端则采用导电银胶进行点胶连接。SOA 的电极也通过一条金线和热沉上单独的电极连接起来,以便于加载探针对 SOA 注入电流。

我们采用的是 FP-5000L 导电银胶,属于环氧树脂型导电银胶,其粘度为 $12000\sim 18000\text{ cps}$,银含量为 $76\sim 82\%$,电阻率小于 $5\times 10^{-4}\Omega\cdot\text{cm}$,传热系数约 $2.5\text{ W/m}\cdot\text{K}$ 。固化烘烤条件为 $150^\circ\text{C}/30\text{ 分钟}$ 。

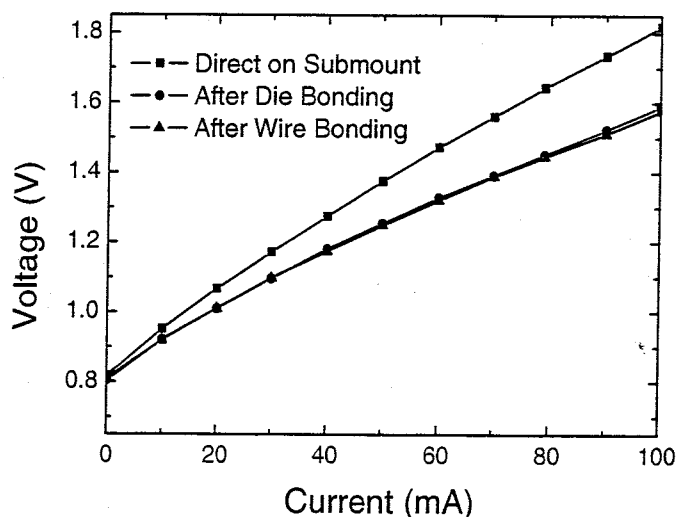


图 6-2 采用导电银胶装焊前后的 SOA 器件 I-V 特性比较

图 6-2 所示的是一个采用导电银胶装焊的 SOA 器件的 I-V 特性,实线是用探针直接压载在热沉上测得的数据,两条虚线分别对应管芯焊接之后和引线点焊之后的数据。根据图 6-2 的曲线,采用导电银胶实现管芯焊接后,由于管芯背电极和热沉之间的导电接触面积增大,接触电阻减小 $2\text{ }\Omega$,I-V 特性得到改善;采用引线点焊前后的 I-V 特性差别很小,说明采用导电银胶点焊的连接特性良好。

6.3 双端光纤耦合测试系统的建立与完善

图 6-3 所示的是对 EA 调制器集成器件进行双端光纤耦合测试的照片。我们采用两根拉锥光纤进行 SOA/EA 集成器件的光耦合。激光由 SOA 端输入, 然后从 EA 调制器端输出。微波耦合通过左边的微波探针接入共面波导传输线, 再由引线传递到 EA 调制器。另外用两根直流探针实现对 SOA 的电流注入。

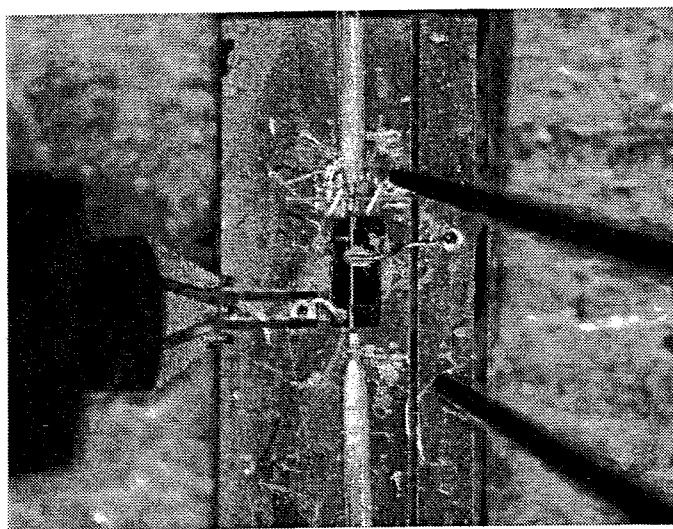


图 6-3 对 SOA/EA 调制器集成器件的双端耦合测试照片

实现双端耦合的首要难点是将激光有效耦合进入器件中。根据 SOA/EA 集成器件的特点, 我们摸索出一套便捷的光纤耦合程序:

- 1、首先将光纤、器件波导方向基本调节平行;
- 2、利用 SOA 的自发辐射光输出, 粗调 SOA 端和 EA 端的光纤耦合;
- 3、将激光注入 SOA 端, 测量 SOA 部分的光生电流, 细调入端光纤耦合, 使光生电流达到最大值;
- 4、设置 SOA 放大电流, 细调 EA 端光纤耦合, 使输出光功率达到最大。

其次, 必须进一步减小耦合损耗以满足 40 Gb/s 高频测试的需要。我们发现有两个因素影响光纤耦合效率。

第一个因素是光纤调节系统的稳定性。我们发现, 由于光纤本身有较大

的晃动，使得我们无法调节到最佳耦合位置。为此我们仔细检查光纤耦合系统，发现并成功排除影响光纤条件架稳定性的关键因素。光纤耦合稳定的情况下，就能够比较顺利可靠地调节到最佳位置。

由于耦合光功率的起伏可能很快，采用直流光功率计难以准确判断耦合系统的稳定性。我们采用一种比较巧妙的方法用以判断耦合系统的稳定性。由于光谱测试时可以实现比较快速的扫描，从而有可能观察到耦合光功率的起伏现象。图 6-4 对比稳定前后的耦合光谱，当光纤耦合不稳定时，由于耦合功率变化较大，光谱测试结果存在明显的不连续性，而稳定后的光功率稳定，光谱基本上保持激光器光谱原样。

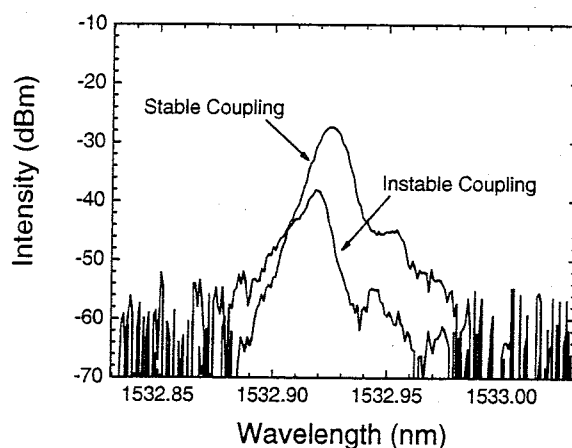


图 6-4 采用光谱测量判定光纤耦合的稳定性

影响光纤耦合效率的另外一个因素是入射光的偏振问题。由于我们制作的 SOA/EA 调制器器件对于 TE 模的入射光具有最大的耦合效率和消光比，所以我们采用偏振控制器保证入射光为 TE 模式。

通过以上两个措施，在采用普通拉锥光纤的条件下，我们将低脊结构的 SOA 端的光纤耦合损耗减小到 5 dB，高脊结构的 EA 端的光纤耦合损耗减小到 6 dB。光纤耦合损耗的数据是根据光生电流的测量值估算的。

6.4 消除微波探针和光探测器引入的高频测试误差

针对 40 Gb/s 高速集成器件的管芯级测试系统，主要包括一台 Agilent 8722 网络分析仪作为微波信号源和接收器，Cascade ACP40-GSG 微波探针用于将微波信号传递到过渡热沉，以及 U2T-XPDV2020 高速光探测器将光信号转换为微波信号。

对于反射系数的测试，只要采用标准共面波导进行校准，就可以将校准平面设置到微波共面探针前端，从而获得准确的器件微波反射特性。

然而对器件的小信号调制响应测试结果却存在两个误差来源，无法通过系统校准消除。首先，由于小信号调制响应测试的 2 端口实际上是光输出，系统校准只能校到微波探针的 K 接头入端，所以微波探针的微波损耗是第一个误差来源。其次，系统校准也无法消除高速探测器自身响应引入的误差。

对于高速探测器的自身响应引入的误差，我们可以通过厂家给出的探测器自身响应曲线加以修正。我们采用的高速探测器响应曲线如图 6-5 所示。

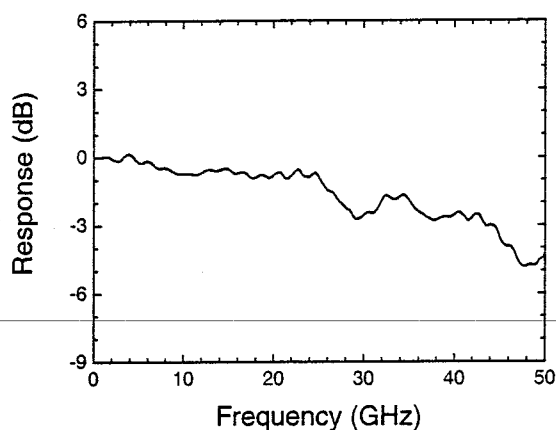


图 6-5 高速光探测器的自身响应曲线

对于微波探针引入的误差，则必须通过先得到其微波损耗特性，再加以扣除。我们采用 OSL(open-short-load)方法得到微波探针的特性^[44,97]：

$$\begin{aligned}
S_{P11} &= \Gamma_{MM} \\
S_{P22} &= \frac{\Gamma_{MO} + \Gamma_{MS} - 2\Gamma_{MM}}{\Gamma_{MO} - \Gamma_{MS}} \\
S_{P21}S_{P12} &= S_{P11}S_{P22} + \frac{(\Gamma_{MO} + \Gamma_{MS})\Gamma_{MM} - 2\Gamma_{MS}\Gamma_{MO}}{\Gamma_{MO} - \Gamma_{MS}}
\end{aligned} \quad (6-1)$$

其中 Γ 是当系统校准到探针的同轴入口后测量样品的反射系数，下标的第一个 M 代表的是测量(measured)得到的，第二个字母中的 M, O, S 分别代表采用匹配负载、开路 and 短路标准样片。

由于微波探针是无源网络，其 $S_{P12}=S_{P21}$ ，因此根据公式(6-1)可以计算得到微波探针的传输损耗，如图 6-6 所示。微波探针的微波损耗到 40 GHz 时已达到 0.6 dB，因此必须加以修正才能得到准确的小信号调制响应。

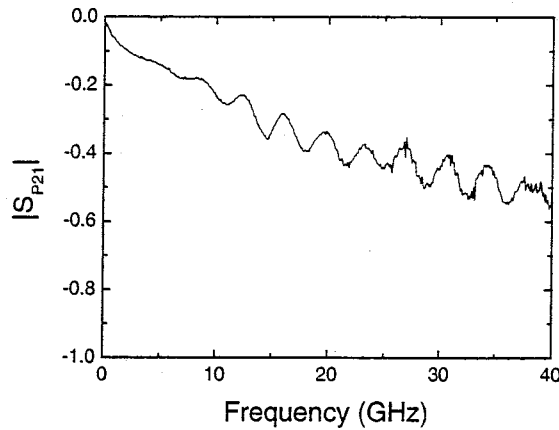


图 6-6 高频微波探针的传输损耗特性

6.5 分析测试数据，获取集成光源特征参数

将探测器自身响应和微波探测损耗的误差修正之后，我们得到准确的小信号调制响应测试结果，如图 6-7 所示。微波反射系数如图 6-8 所示。测试条件是：激光波长 1525 nm，输入端纤内光功率 -3 dBm，SOA 放大电流 60 mA，EA 调制器反向偏置电压 0.85 V。根据测试结果，集成器件的小信号调制 3 dB 带宽大于 40 GHz，这是迄今为止基于 IEL 集成结构的集成器件

的最好结果^[38]。

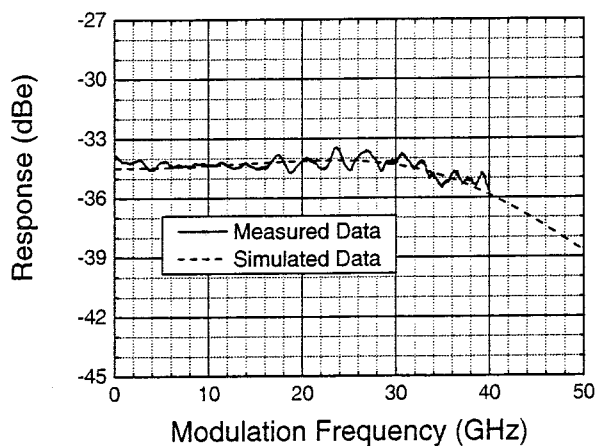


图 6-7 SOA/EA 调制器集成器件的小信号调制响应的测试与计算结果

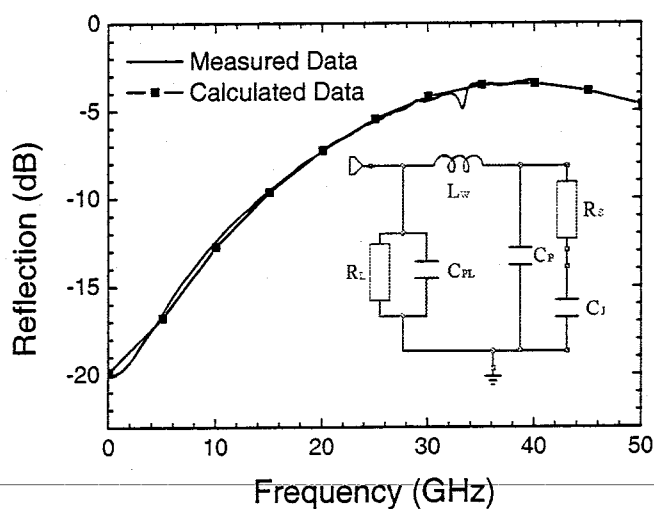


图 6-8 SOA/EA 调制器集成器件反射系数的测试和计算结果

根据第四章的调制器模型和第五章的高速热沉电路模型，我们得到的管芯级测试电路模型如 6-8 中的附图所示，其中热沉包括一个匹配电阻 R_L 和寄生电容 C_{PL} ，EA 调制器由电极电容 C_P 、结区电容 C_J 和串联电阻 R_S 组成，引线电感为 L_W 。我们采用此等效电路对测得的微波反射系数和小信号调制

响应曲线进行拟和计算,结果如图 6-7 和图 6-8 所示。根据拟和结果,我们得到管芯级封装集成器件的关键特征参数:电极电容为 0.06 pF,结区电容为 0.068 pF,串联电阻为 50 Ω ,引线电感为 0.16 nH,热沉匹配电阻 42 Ω ,寄生电容 0.015 pF,其中热沉参数是根据单独热沉的微波测试结果得到。根据图 6-7 中拟和的调制曲线,此集成器件的调制带宽估计为 45 GHz^[38]。

根据对测试结果的分析,对于器件制作、热沉制作和管芯级封装可以得到以下一些反馈信息:

- 1、在集成器件中,EA 调制器采用干法刻蚀高脊结构和厚绝缘层平面化结构,将 EA 调制器总电容减小到仅 0.13 pF,使调制带宽超过 40 GHz;
- 2、管芯的问题之一是串联电阻偏大,影响调制带宽的进一步提高,这需要在以后的工作中加以改进;
- 3、器件的高速调制特性已充分证明高速热沉的良好微波特性和实用可行性;
- 4、管芯级封装的电感已减小到 0.2 nH 以下,证明我们采用的工艺确实有效地减小引线长度和引线电感。

6.6 工作参数对小信号调制特性的影响分析

6.6.1 工作波长的影响

根据图 6-9 所示曲线中,从 1510 nm 到 1525 nm,调制曲线逐渐变缓,调制带宽逐渐提高到 40 GHz 以上;从 1530 nm 到 1540 nm,调制带宽又逐渐减小。其他测试条件为:入射激光功率 -3 dBm, SOA 放大电流 60 mA, EA 调制器反向偏置电压 0.8 V。

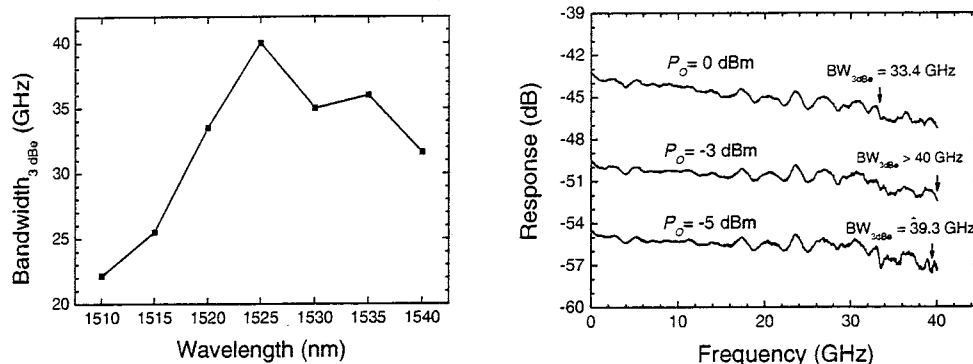


图 6-9 调制带宽与工作波长的关系 图 6-10 入射光功率与调制响应曲线

6.6.2 入射光功率的影响

对于图 6-10 中不同的调制响应曲线，我们发现入射光功率在 0 dBm 时的调制带宽最小，仅 33.4 GHz，而 -3 dBm 和 -5 dBm 对应的调制响应很相似，调制带宽约 40 GHz。其他测试条件为：激光波长 1525 nm，SOA 注入电流 60 mA，EA 调制器反向偏置电压 0.95 V。

6.6.3 偏置电压的影响

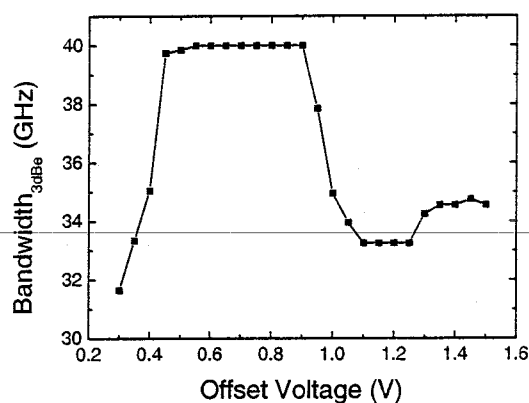


图 6-11 不同偏置电压条件得到的小信号调制带宽特性

根据图 6-11，当反向偏置电压从 0.3 V 加到 0.45V，调制带宽从 32 GHz 增加到 39 GHz；反向偏置电压从 0.45V 加到 0.9 V，调制带宽一直大于 40

GHz; 反向偏置电压从 0.9 V 增加时, 调制带宽下降到 34 GHz 左右。其他测试条件是: 激光波长 1525 nm, 入射光功率 -3 dBm, SOA 注入电流 60 mA。

6.6.4 讨论

实验结果表明, 工作波长、入射激光功率和偏置电压对调制带宽有明显的影响。根据文献^[81], 光生电流有利于提高调制带宽。但采用光生电流的模型无法解释入射光功率上升却引起调制带宽减小的现象, 因为入射光功率增加会引起光生电流上升, 应有利于调制带宽提高。就目前所掌握的实验数据和已有的理论模型, 尚不能对以上的实验现象作出圆满的解释。

6.7 本章小结

本章通过自主开发的管芯级封装技术, 将 SOA/EA 调制器集成器件成功焊接在高速热沉上, 并实现低的电感引线连接。建立用于高速集成器件的双端光纤耦合测试系统, 并采用独特方法减小耦合损耗; 在直接测试结果的基础上, 消除测试误差, 获得准确的器件高频调制特性。通过等效电路模拟, 成功地获取得到集成器件中的关键特征参数。

我们采用导电银胶将管芯焊接到高速热沉上, 可方便地调整管芯到最佳位置, 为减小引线长度提供可能, 而且可实现良好的电极连接特性。采用导电银胶点焊工艺将金丝引线焊接到器件焊盘, 既最大限度地减小引线长度, 实现低电感连接, 又避免了传统超声焊接工艺中管芯焊盘容易损坏的问题。

我们成功搭建了一套可到 40 GHz 的小信号调制特性测试系统, 其中包括可用于高速 SOA/EA 调制器集成器件的双端光纤耦合系统。通过改善耦合系统, 摸索耦合技术, 实现了较低的光纤耦合效率, 为高频调制响应测试提供了条件。通过修正高频探针传输损耗和探测器自身高频响应, 获得了准确的小信号调制特性数据。根据测试结果, 我们实现了小信号调制带宽超过 40 GHz 的 IEL 结构集成光源, 这是迄今为止报道的 IEL 结构集成光源的最高带宽结果。

采用等效电路模型分析模拟测试数据，从而获取得到高速 EA 调制器、高速热沉和焊接引线等各部分的特征参数，为前面的制作工艺和封焊技术提供反馈。根据拟和结果，40 GHz 电吸收调制器的电容已经减小到 0.13 pF 以下。

最后我们通过实验研究了入射波长、入射光功率、偏置电压等工作参数对于集成光源小信号调制带宽的影响。

结 论

随着光纤通信系统的快速发展, 40 Gb/s 技术已成为研究热点。高速 EA 调制器具有速度高、体积小、驱动电压低等优点, 是光纤通信系统的重要器件之一。

为了实现 40 Gb/s 高速 EA 调制器集成器件, 本论文从管芯设计制作、高速热沉和管芯级封装、测试各环节展开研究。首先, 根据传输特性模拟对 EA 调制器的工作参数和量子阱材料结构参数进行优化设计。通过改进管芯结构和制作工艺, 在减小调制器电容的同时改善器件特性。同时, 研制出具有低微波损耗、良好阻抗匹配的高速微波热沉, 并开发出管芯级封装技术, 有效地减小引线电感。在此基础上, 建立了 40 Gb/s 集成器件的小信号高频测试系统, 完成了对高速集成器件管芯的测试, 获得了大于 40 GHz 的调制带宽。

本文的主要研究成果如下:

1、为了改善 EA 调制器的系统传输特性, 通过传输特性模拟完成对 EA 调制器工作参数和材料结构的优化设计。

2、在国内率先制作成功 10 Gb/s DFB 激光器/EA 调制器集成光源管芯, 最低阈值电流仅为 6 mA, 其高频调制特性已达到 10 Gb/s 传输系统的要求。

3、通过采用新型 ICP 干法刻蚀技术减小高脊宽度, 采用基于厚 SiO₂ 膜的绝缘层平面化工艺, 成功地将 EA 调制器电容减小到约 0.13 pF, 在国际上首次实现了调制带宽超过 40 GHz 的同一外延层结构集成器件。

4、在国际上首次实现用于 40 Gb/s EA 调制器的硅基高速过渡热沉, 管芯级测试结果显示其带宽达 33GHz。

5、建立和完善了 40 Gb/s 小信号调制响应测试系统, 成功地实现了 40 Gb/s EA 调制器集成器件的高频测试。

结 论

参考文献

- [1] 文国鹏. 2.5 Gb/s 1.5 μm 增益耦合型 DFB 激光器/EA 调制器单片集成光源的研究: [博士学位论文]. 北京: 清华大学电子工程系, 1999
- [2] Agrawal G P. Fiber-optic communication systems. 3rd ed. New York: Wiley-Interscience, 2002.
- [3] Fukuchi K. Wideband and ultra-dense WDM transmission technologies toward over 10-Tb/s capacity. in: Technical Digest Series of Conference on Optical Fiber Communication, Anaheim, USA, 2002. 558-559
- [4] Zhu B. Ultra high density and long haul transmissions. in: Technical Digest Series of Conference on Optical Fiber Communication, Los Angeles, 2004. ThE1
- [5] Li G L, Yu P K L. Optical intensity modulators for digital and analog applications. J. Lightwave Technol., 2003, 21(9):2010-2030
- [6] Sato K. Semiconductor light sources for 40-Gb/s transmission systems. J. Lightwave Technol., 2002, 20(12):2035-2043
- [7] Salvatore R A, Sahara R T, Bock M A, et al. Electroabsorption modulated laser for long transmission spans. IEEE J. Quantum Electron., 2002, 38(5):464-476
- [8] DeSalvo R, Wilson A G, Rollman J, et al. Advanced components and sub-system solutions for 40 Gb/s transmission. J. Lightwave Technol., 2002, 20(12):2154-2181
- [9] Dagli N. Wide-bandwidth lasers and modulators for RF photonics. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 1999, 47(7 pt 2):1151-1171
- [10] 孙长征. DFB 激光器与高速 EA 调制器集成光源的性能优化: [博士学位论文]. 北京: 清华大学电子工程系, 2000
- [11] Mason B, Ougazzaden A, Lentz C W, et al. 40-Gb/s tandem electroabsorption modulator. IEEE Photon. Technol. Lett., 2002, 14(1):27-29
- [12] Devaux F, Ougazzaden A, Huet F, et al. Lossless InAsP-InGaP modulator at 1.3 μm for optical conversion of radio signals up to 40 GHz. IEEE Photon. Technol. Lett., 1997, 9(7):931-3
- [13] Lewen R, Irmscher S, Westergren U, et al. Segmented transmission-line electroabsorption modulators. J. Lightwave Technol., 2004, 22(1):172-179
- [14] Mitomi O, Kotaka I, Wakita K, et al. 40-GHz bandwidth InGaAs/InAlAs multiple quantum-well optical-intensity modulator. Appl. Optics, 1992, 31(12):2030-2035

- [15] Mitomi O, Nojima S, Kotaka I, et al. Chirping characteristic and frequency response of MQW optical intensity modulator. *J. Lightwave Technol.*, 1992, 10(1):71-77
- [16] Devaux F, Bordes P, Ougazzaden A, et al. Experimental optimisation of MQW electroabsorption modulators with up to 40 GHz bandwidths. *Electron. Lett.*, 1994, 30(16):1347-1348
- [17] Ramdane A, Delprat D, Devaux F, et al. Multiple quantum well distributed feedback laser-electroabsorption modulator light source with 36 GHz bandwidth. in: *Tech. Dig. Conf. Lasers and Electro-Optics (CLEO Pacific Rim' 95)*, Chiba, Japan, 1995. FQ4
- [18] Devaux F, Chelles S, Harmand J C, et al. Polarization independent InGaAs/InAlAs strained MQW electroabsorption modulator with 42 GHz bandwidth. in: *Digest of 10th International Conference on Integrated Optics and Optical Fibre Communication*, Hong Kong, 1995. FB3-2
- [19] Ido T, Tanaka S, Suzuki M, et al. An ultra-high-speed (50 GHz) MQW electro-absorption modulator with waveguides for 40 Gbit/s optical modulation. in: *Digest of 10th International Conference on Integrated Optics and Optical Fibre Communication*, Hong Kong, 1995. PD1-1
- [20] SATZKE K, BAUMS D, CEBULLA U, et al. Ultrahigh-bandwidth (42 GHz) polarization-independent ridge-wave-guide electroabsorption modulator based on tensile-strained InGaAsP MQW. *Electron. Lett.*, 1995, 31(23):2030-2032
- [21] Yoshino K, Wakita K, Kotaka I, et al. 40-Gbit/s operation of InGaAs/InAlAs MQW electroabsorption modulator module with very low driving-voltage. in: *Proceedings of the 1996 22nd European Conference on Optical Communication, ECOC. Part 3 (of 6)*, Oslo, Norway:IEEE, Piscataway, NJ, USA, 1996. 3-203
- [22] Takeuchi H, Tsuzuki K, Sato K, et al. Very high-speed light-source module up to 40 Gb/s containing an MQW electroabsorption modulator integrated with a DFB laser. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1997, 3(2):336-343
- [23] Yoshino K, Takeshita T, Kotaka I, et al. Compact and stable electroabsorption optical modulator modules. *J. Lightwave Technol.*, 1999, 17(9):1700-1707
- [24] Bond A E, Shtengel G, Singh P, et al. High speed packaged electroabsorption modulators for optical communications. in: *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference*, Las Vegas, NV, USA:Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Piscataway, NJ, USA, 2000. 469-473

- [25] Burie J R, Dumont F, Gouezigou O, et al. 50 Gb/s capability of a new zero loss integrated SOA/EA modulator. in: Proceeding of The 26th European Conference on Optical Communication, Munich, 2000. 1.3.3
- [26] Kawanishi H, Yamauchi Y, Mineo N, et al. EAM-Integrated DFB laser modules with more than 40-GHz bandwidth. IEEE Photon. Technol. Lett., 2001, 13(9):954-956
- [27] Miyahara T, Kaneko S, Noda M, et al. High-speed electroabsorption (EA) modulator modules using the flip-chip bonding (FCB) technique. in: Technical Digest Series of Conference on Optical Fiber Communication, Anaheim, CA:Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2001. WDD67.1-3
- [28] Mineo N, Nagai K, Ushikubo T. Ultra wide-band electroabsorption modulator modules for DC to millimeter-wave band. in: Technical Digest of 2001 International Topical Meeting on Microwave Photonics, Long Beach, CA, USA:IEEE, 2001. 9-12
- [29] Feng H, Makino T, Ogita S, et al. 40 Gb/s electro-absorption-modulator-integrated DFB laser with optimized design. in: Technical Digest Series Conference on Optical Fiber Communication, Anaheim, CA, United States:Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2002. 340-341
- [30] Tada H, Miyazaki Y, Takagi K, et al. 40 GHz modulation bandwidth of electroabsorption modulator with narrow-mesa ridge waveguide. in: Technical Digest Series of Conference on Optical Fiber Communication, Anaheim, CA, United States:Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2002. 722-723
- [31] Kawanishi H, Suzuki T, Nakamura K, et al. 1.3 μm EAM-integrated DFB Lasers for 40 Gb/s Very-Short-Reach Application. in: Technical Digest Series of Conference on Optical Fiber Communication, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2003. 270-271
- [32] Prosyk K, Moore R, Betty I, et al. Low loss, low chirp, low voltage, polarization independent 40Gb/s bulk electro-absorption modulator module. in: Technical Digest Series of Conference on Optical Fiber Communication, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2003. 269-270
- [33] Datasheet for 40Gbps EA modulator (OM5653C-30B). Tokyo: Oki Electric Industry Co., 2002.
- [34] 罗毅, 张盛忠, 司伟民, 等. GaAlAs/GaAs 增益耦合型分布反馈式半导体激光器/电吸收调制器单片光子集成器件的研制. 第六届纤维光学集成光学学术会议论文集, 四川成都, 1994. 146

- [35] Luo Y, Pu R, Sun C, et al. Very simple integrated DFB laser/EA modulator utilizing gain coupling. in: Digest of 10th International Conference on Integrated Optics and Optical Fibre Communication, Hong Kong, 1995. ThD2-1
- [36] Luo Y, Wen G-P, Sun C-Z, et al. 2.5 Gb/s electroabsorption modulator integrated with partially gain-coupled distributed feedback laser fabricated using a very simple device structure. Jpn. J. Appl. Phys., Part 2: Letters, 1999, 38(5 PART 2):524-526
- [37] Xiong B, Sun C, Wang J, et al. Low threshold DFB laser integrated high speed EA modulators based on ridge waveguide structure by ICP etching. in: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Shanghai, China: The International Society for Optical Engineering, 2002. 161-164
- [38] Xiong B, Wang J, Zhang L, et al. High-speed (> 40 GHz) integrated electroabsorption modulator based on identical epitaxial layer approach. IEEE Photon. Technol. Lett. (已接受待发表)
- [39] Hayee M, Willner A. NRZ versus RZ in 10-40-Gb/s dispersion-managed WDM transmission systems. IEEE Photon. Technol. Lett., 1999, 11(8):991-993
- [40] Souli N, Devaux F, Ramdane A, et al. 20 Gbit/s high-performance integrated MQW tandem modulators and amplifier for soliton generation and coding. IEEE Photon. Technol. Lett., 1995, 7(6):629-631
- [41] Preliminary data sheet for 40 Gbit/s lithium niobate electro-optic modulator. Allentown, PA, USA: Agere Systems Inc., 2002.
- [42] Ebberg A, Auracher F, Borchert B. 10Gbit/s transmission using directly modulated uncooled MQW ridge waveguide DFB lasers in TO package. Electron. Lett., 2000, 36(17):1476-1477
- [43] Lindgren S, Ahlfeldt H, Kerzar B, et al. Packaging of high speed DFB laser diodes. in: 22nd European Conference on Optical Communication, 1996. 97-102
- [44] 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
- [45] Corvini P J, Koch T L. Computer simulation of high-bit-rate optical fiber transmission using single-frequency lasers. J. Lightwave Technol., 1987, LT-5(11):1591-1595
- [46] Kim S, Mizuhara O, Park Y, et al. Theoretical and experimental study of 10 Gb/s transmission performance using $1.55\ \mu\text{m}$ LiNbO₃-based transmitters with adjustable extinction ratio and chirp. J. Lightwave Technol., 1999, 17(8):1320-1325

- [47] Devaux F, Muller S, Ougazzaden A, et al. Zero-loss multiple-quantum-well electroabsorption modulator with very low chirp. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, 64(8):954-6
- [48] Ramdane A, Ougazzaden A, Devaux F, et al. Very simple approach for high performance DFB laser-electroabsorption modulator monolithic integration. *Electron. Lett.*, 1994, 30(23):1980-1981
- [49] Aoki M, Suzuki M, Sano H, et al. InGaAs/InGaAsP MQW electroabsorption modulator integrated with a DFB laser fabricated by band-gap energy control selective area MOCVD. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, 29(6):2088-2096
- [50] Tanbunek T, Chen Y K, Grenko J A, et al. Integrated DFB DBR laser modulator grown by selective-area metalorganic vapor-phase epitaxy growth technique. *J. Cryst. Growth*, 1994, 145(1-4):902-906
- [51] Ramdane A, Devaux F, Souli N, et al. Monolithic integration of multiple-quantum-well lasers and modulators for high-speed transmission. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1996, 2(2):326-335
- [52] Sun C, Xiong B, Wang J, et al. 10 Gb/s EML module based on identical epitaxial layer scheme. *Chinese Journal of Semiconductors* (已投稿)
- [53] Xiong B, Wang J, Cai P, et al. Novel low-cost wideband si-based submount for 40 Gb/s optoelectronic devices. *Microw. Opt. Technol. Lett.* (已投稿)
- [54] 熊兵, 王健, 蔡鹏飞, 等. 用于 40 Gb/s 光电子器件的新型低成本硅基过渡热沉. *半导体学报* (已投稿)
- [55] Fells J A J, Gibbon M A, White I H, et al. Transmission beyond the dispersion limit using a negative chirp electroabsorption modulator. *Electron. Lett.*, 1994, 30(14):1168-1169
- [56] Yu J J, Fischer M, Chand N, et al. 10-Gb/s transmission over 200-km conventional fiber without dispersion compensation using the bias control technique. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, 14(12):1746-1748
- [57] Ohtoshi T. Numerical analysis of a parameters and extinction ratios in InGaAsP-InP optical modulators. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2003, 9(3):755-762
- [58] Yamanaka T, Yokoyama K. Design and analysis of low-chirp electroabsorption modulators using bandstructure engineering. in: *Physics and Modeling of Devices Based on Low-Dimensional Structures*, 1998. *Proceedings., Second International Workshop on*, 1998. 40-45