

集成光源模块封装工艺优化研究
Study on Optimization of Packaging
Technologies for Integrated Light
Source Modules

(申请清华大学工学硕士学位论文)

培 养 单 位 : 电子工程系

学 科 : 电子科学与技术

研 究 生 : 袁 贺

指 导 教 师 : 孙 长 征 副教授

二〇一〇年五月

集成光源模块封装工艺优化研究

袁
贺

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解清华大学有关保留、使用学位论文的规定，即：

清华大学拥有在著作权法规定范围内学位论文的使用权，其中包括：（1）已获学位的研究生必须按学校规定提交学位论文，学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文；（2）为教学和科研目的，学校可以将公开的学位论文作为资料在图书馆、资料室等场所供校内师生阅读，或在校园网上供校内师生浏览部分内容。

本人保证遵守上述规定。

（保密的论文在解密后遵守此规定）

作者签名： _____

导师签名： _____

日 期： _____

日 期： _____

摘 要

高速分布反馈(DFB)半导体激光器与电吸收(EA)调制器集成光源的模块封装技术是影响其在光纤通信系统中实际应用的关键因素之一。本论文以实验室已有条件为基础,进行了集成光源模块封装技术的优化研究,实现了对集成光源管芯存在的张弛振荡的有效的抑制。同时,解决了模块封装中的一系列技术问题,完成了高速光源模块的封装制作,并对其特性进行了评测。

论文针对集成光源小信号调制响应中张弛振荡的抑制,为了解决单层膜抗反射存在的工艺不稳定的问题,开展了基于等离子体化学气相沉积(PECVD)的多层抗反镀膜的研究。论文首先细致地研究了 PECVD 的各种沉积条件对 $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ 薄膜折射率及沉积速率的影响,得到了适合多层抗反射镀膜的沉积条件。基于得到的 SiO_2 及 SiN_x 材料特性,设计了 $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2$ 四层抗反射镀膜结构,并在 F-P 激光器端面进行了多层抗反射镀膜沉积实验。通过对镀膜前后自发辐射光谱的测量,确认在 1535 ~ 1565 nm 波段内多层膜的反射率均达到了 10^{-4} 量级。该多层抗反镀膜技术可以满足 DFB+EA 集成光源管芯的抗反射镀膜要求,同时提高了工艺的稳定性 and 可重复性。

在实验室已有的研究基础上,使用商用管壳进行了完整的模块封装工艺研究,解决了模块封装中遇到的微波接地、EA 调制器的引线焊接等问题,最终完成集成光源模块的制作并进行系统的性能测试。模块的小信号调制响应带宽达到了 32 GHz,在 43 Gb/s 非归零码(NRZ)码大信号调制下具有良好的眼图性能,动态消光比大于 8.2 dB,满足了 40 Gb/s 的应用要求,其特性指标已达到或接近商用产品的水平。

关键词: 分布反馈激光器; 电吸收调制器; 集成光源模块封装; 抗反射镀膜; 小信号调制响应

Abstract

Module packaging is one of the key issues in the application of high-speed distributed feedback (DFB) semiconductor laser integrated electroabsorption (EA) modulators in fiber communication systems. This thesis focus on the optimization of packaging technologies for integrated light source modules based on previous research work carried out in our laboratory. The relaxation oscillation of the DFB laser caused by optical reflection at the EA modulator facet is effectively suppressed. Integrated light source modules are successfully fabricated by solving a series of technical problems in module packaging, and the performances of the transmitter modules are characterized.

To overcome the repeatability problem associated with single SiN_x layer antireflection (AR) coating, multilayer AR coating based on plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) is investigated to suppress the relaxation oscillation in small signal modulation response. Suitable deposition conditions for obtaining $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ thin films are determined through a systematic study of factors influencing the refractive index of deposited SiN_x thin film. A four-layer $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ AR coating is designed to obtain a reflectivity of less than 10^{-4} at 1550 nm. Based on the simulation results, $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ multilayer AR coating is deposited to the end facet of a Fabry-Perot laser. By analyzing the output spectra of laser before and after AR coating, the residual reflectivity of the AR coating is determined to be on the order of 10^{-4} over the wavelength range of 1535-1565 nm. The multilayer AR coating technology meets the requirement of DFB+EA integrated light sources, and it improves the stability and repeatability of the AR coating process.

Module packaging of integrated light source is carried out by using commercialized packages. After solving the problems such as microwave signal grounding and EA modulator wire bonding, integrated light source module is fabricated and its performance is tested. The small signal 3-dB

bandwidth of the module is over 32 GHz, and clear eye-opening is demonstrated under 43 Gb/s non-return-to-zero (NRZ) large signal modulation, with a dynamic extinction ratio in excess of 8.2 dB. The module shows promising potential for applications in 40 Gb/s fiber communications, and its performance is comparable with that of commercialized products.

Keywords: distributed feedback (DFB); electroabsorption (EA); Integrated light source module packaging, anti-reflection (AR) coating; small signal modulated response

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 实验室前期制作集成光源模块的成果	1
1.3 问题分析及解决方案	3
1.4 论文的主要内容	6
第 2 章 多层抗反射镀膜的设计及制作	7
2.1 本章引论	7
2.2 实验条件研究	7
2.2.1 SiH_4 和 NH_3 气体流量比的影响	8
2.2.2 温度的影响	10
2.2.3 反应室压强的影响	11
2.2.4 射频功率的影响	12
2.2.5 实验条件选择	13
2.3 多层膜的设计	14
2.4 抗反射镀膜特性评测	18
2.5 本章总结	19
第 3 章：集成光源模块封装及其性能测试	21
3.1 本章引论	21
3.2 管芯级封装工艺及小信号调制响应测试	24
3.2.1 管芯级封装工艺及遇到的问题	24
3.2.2 小信号调制响应测试及分析	27
3.2.3 封装模式的改进及测试	30
3.3 集成光源模块化封装及其性能测试	33
3.3.1 集成光源模块化封装工艺	33
3.3.2 集成光源模块性能测试	34
3.4 本章小结	40
第 4 章 总结	41

4.1 研究总结	41
4.2 对下一步工作的建议	41
参考文献	42
致 谢	45
个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果	46

主要符号对照表

DFB	Distributed Feedback 分布式反馈
EA	Electroabsorption 电吸收
EML	Electro-absorption Modulated Laser 电吸收调制器集成光源
CPW	Coplanar Waveguide 共面波导
AR	Anti-Reflection 抗反射
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition 等离子体增强化学气相沉积
TEC	Thermoelectric Coolers 半导体致冷器
ASE	Amplified Spontaneous Emission 放大自发辐射噪声

第1章 绪论

1.1 研究背景

随着时代的变迁,信息交流在现代社会中起到越来越重要的作用,人们对通信服务的要求越来越高。现代通信正在向着更高速,更大容量的方向迅速发展。随着互联网和通信网络的发展,各种高速信息设备不断出现,设备高速互联甚至芯片之间高速互联的需求也逐渐显现。目前看来,不论是远距离高速干线通信、中等距离城域通信、还是短距离高速设备互联,光通信都是未来能够满足这些需求的最重要和最基本的通信手段。因此,高速光源作为光通信系统中核心器件,其研究具有重要的现实意义。

通信市场的繁荣,使得高速光源成为了研究热点。近年来,高速光源的传输速率也从最初的 2.5 Gb/s 发展到 10 Gb/s,并正在向 40 Gb/s 乃至 100 Gb/s 复用演进^[1-4]。目前,10 Gb/s 系统已经获得广泛应用,而 40 Gb/s 系统的技术也日趋成熟。国外著名的通信制造商和研究机构如 Alcatel, OKI, Hatachi, NTT, Fujitsu, ETRI 等,均已经进行了 40 Gb/s 集成光源的研究,并有相应的商业化产品问世,为光通信网络从 10 Gb/s 到 40 Gb/s 的演化,创造了有利条件。

集成光源管芯由于其自身的特点,不能直接应用于通信系统,为了实现高速集成光源的实用化,需要对其进行模块封装。因此,提高集成光源模块的稳定性、可靠性与高频特性对于集成光源的实际应用具有重要意义。

1.2 实验室前期制作集成光源模块的成果

本实验室基于同一外延层结构,在国内率先完成了基于 InGaAsP 多量子阱材料的 2.5 Gb/s 及 10 Gb/s 分布反馈 (Distributed Feedback, DFB) 激光器和电吸收 (Electroabsorption, EA) 调制器集成光源管芯及发射模块的制作^[5-6]。最近,又完成了基于 AlGaInAs 多量子阱材料的 40 Gb/s DFB 激光器和 EA 调制器集成光源 (Electro-absorption Modulated Laser, EML) 管芯及发射模块原型器件的制作^[7-8],其管芯结构示意图如图 1.1 所示。

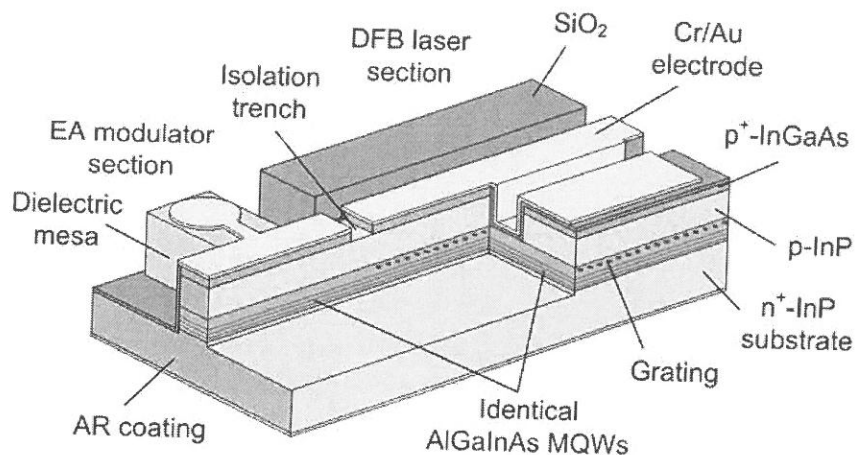


图1.1 40 Gb/s EML集成光源管芯结构示意图

在集成光源管芯的基础上，本实验室对集成管芯的模块化封装和测试进行了初步研究。集成管芯的模块化封装包括两个步骤：管芯级封装和模块级封装。首先通过管芯级封装将集成管芯焊接到专用的共面波导（Coplanar Waveguide, CPW）传输线上^[9]，然后将测试性能良好的带集成管芯的传输线焊接到自行设计制作的基于 K 型接头的集成光源模块管壳中，并进行光纤耦合，以形成在光通信链路中可用的实际器件。图 1.2 为前期实验室研究中完成的集成光源模块的封装结构示意图。

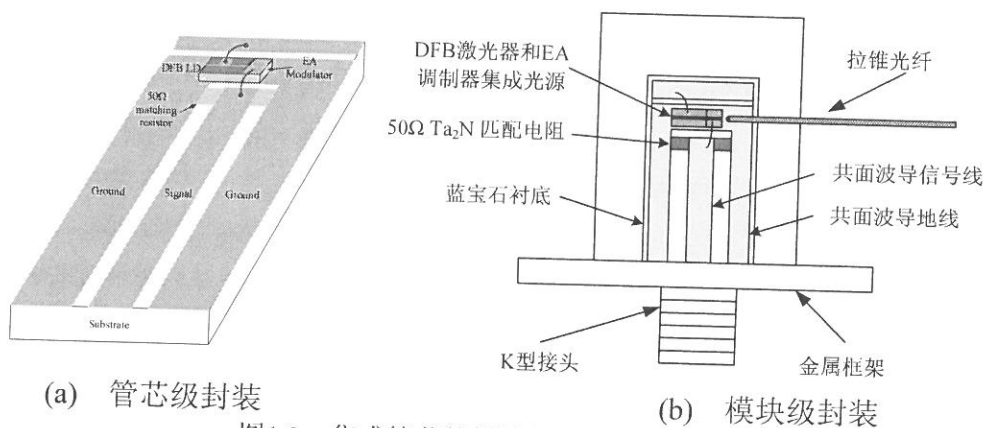


图1.2 集成管芯的模块封装结构示意图

本实验室对封装好的模块进行了小信号调制响应及大信号传输眼图的测试，具体测试方案在第 3 章详细介绍，测试结果如图 1.3 与图 1.4 所示。从传输眼图上明显可以看出，眼睛张开度很低，模块的性能还很差。

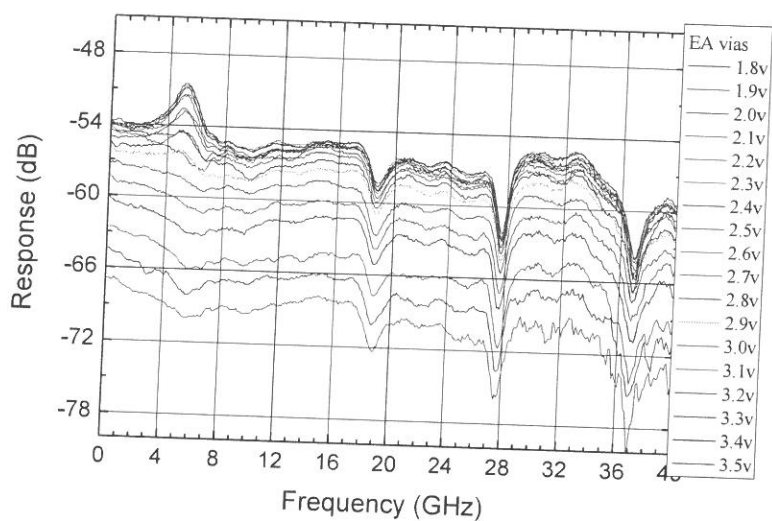


图1.3 实验室前期模块的小信号调制响应曲线

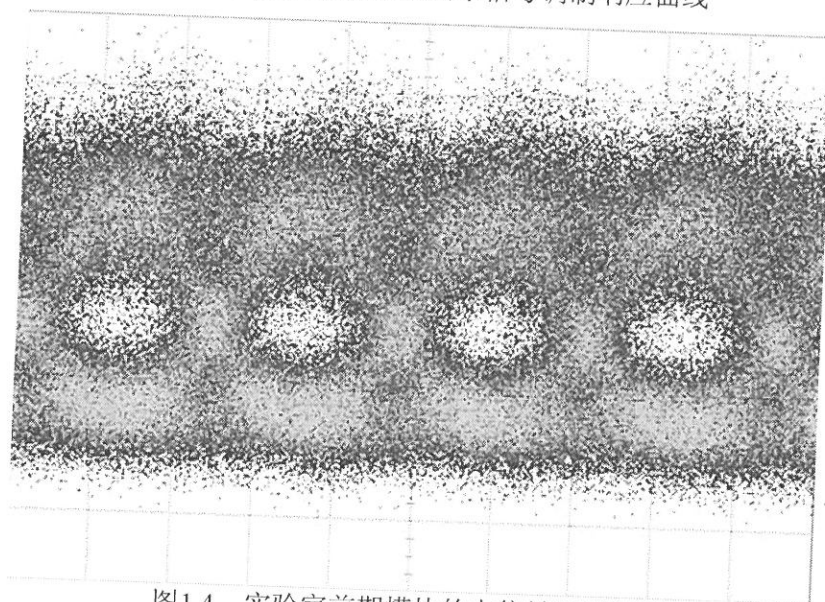


图1.4 实验室前期模块的大信号调制眼图

1.3 问题分析及解决方案

从已经得到的小信号调制响应曲线来看,在低频区域 5-6 GHz 附近存在着明显的起伏,且起伏的形状随着调制器偏置电压的变化有所不同。在高频区域, 19 GHz, 28 GHz, 37 GHz 频率处存在着不随偏置电压变化的谐振现象。反映在大信号眼图上,该模块的眼图的上下眼皮较厚,导致眼睛的张开度较差。

经过我们的分析发现,调制响应曲线中低频区域响应曲线的起伏是由 DFB 激光器的张弛振荡引起的,而高频区域的谐振是由微波谐振引起的。微波谐振的问题本实验室在前期工作中进行了较为细致完整的分析,取得了良好的抑制效果^[10],本论文将不再详细介绍。

我们采用如图 1.5 所示的模型对集成光源调制响应中低频起伏的起因进行讨论^[19]。由于 EA 端面存在着一定的残余光反馈,而集成光源中 DFB 激光器与 EA 调制器之间缺少有效的光隔离措施,所以导致一部分经调制的反射光进入到 DFB 激光器中。这会造成对 DFB 激光器的直接调制,从而产生了张弛振荡,表现为小信号调制响应曲线中的低频起伏,影响了集成光源的性能。

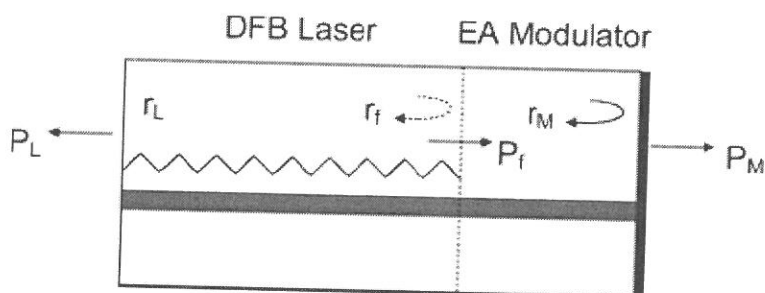


图1.5 集成光源调制响应中低频起伏的起因

为了改善集成光源的性能,需要抑制 DFB 激光器的张弛振荡,以获得平坦的调制响应。目前文献报道的降低端面反射的方法包括窗口结构^[11-13],倾斜波导^[14-15],以及端面抗反射(Anti-Reflection, AR)镀膜等方法。由于端面抗反射镀膜具有工艺简单,易于实现等优点,在抑制半导体光放大器及超辐射二极管中的 FP 模式^[16],都具有广泛的应用。实验室前期已经对应用于光电子器件的端面镀膜技术开展过研究^[17],采用等离子体增强型化学气相沉积(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)制备单层 SiN_x 抗反射镀膜的方法抑制张弛振荡。图 1.6 所示为经过了抗反射镀膜、并采取了一定的措施抑制微波谐振后的模块封装眼图。从图中可以看出,眼图特性得到了极大的提高,这说明我们对问题的解决思路是完全正确的。

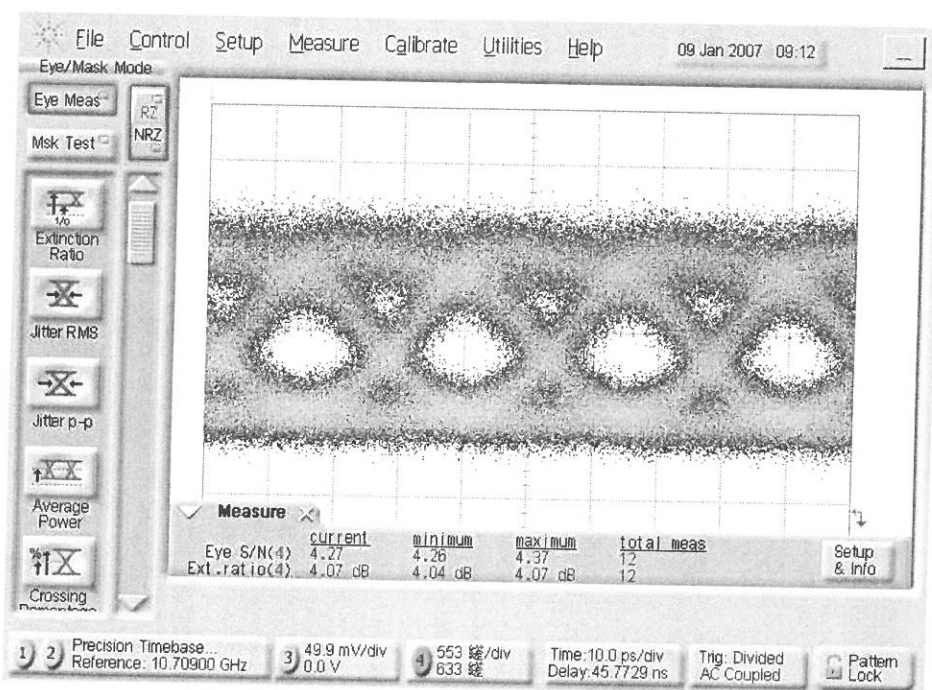


图1.6 集成光源模块的大信号调制眼图

虽然实验室前期制作的模块取得了一定的成果，但是在模块制作工艺中还存在一系列需要进一步解决的问题，主要体现以下两个方面：

其一，由于 PECVD 不具备薄膜厚度实时监测的功能，而单层抗反射镀膜对膜厚度的要求极高，所以这种方案的工艺可重复性较差。针对这一问题，本论文将对抗反射镀膜沉积的可靠性及工艺可重复性方面进行细致的研究。在此基础上，采用多层抗反射镀膜的新方法进行抗反射镀膜的沉积，以提高工艺鲁棒性。

另一方面，在已经制作成功的集成光源模块中没有加入半导体制冷器 (Thermoelectric Coolers, TEC) 及热敏电阻等功能部件，无法对器件的温度进行控制，严重影响管芯的寿命及模块的稳定性。为此，需要对模块的封装进行更好的设计和制作。实验室前期已经提出了模块封装的基本方案，但是尚未进行集成光源模块的完整封装与相关的特性评测。本论文中采用商用管壳进行了集成光源模块的封装及完整的模块性能测试。通过对封装过程中遇到的问题及难点进行细致的分析，对封装方案进行了相应的调整。最后对模块封装的结果进行了评测。

1.4 论文的主要内容

本论文主要针对集成光源模块封装遇到的问题进行细致的分析，抑制张弛振荡并实现集成光源模块封装的制作，对模块的性能进行评测。

论文第 2 章主要研究多层抗反射镀膜的设计方案及性能评测，得到鲁棒性好，工艺可重复性好的多层抗反射镀膜；

论文第 3 章主要进行集成光源模块的封装，针对模块封装中遇到的问题进行分析，改进封装方案，并对制作完成的光源模块进行系统的评测。

论文第 4 章对本文进行总结，归纳本论文的研究成果，并对未来的研究做一展望。

第2章 多层抗反射镀膜的设计及制作

2.1 本章引论

本章基于 PECVD 沉积的 $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ 薄膜进行多层抗反镀膜的设计与制作研究。抗反膜技术在光电子器件中有着广泛的应用。例如,在半导体光放大器中,需要采用反射率为 10^{-4} 量级抗反镀膜以有效抑制 F-P 模式^[18]。在本实验室制作的 DFB 半导体激光器与 EA 调制器集成器件中,需要在 EA 调制器端面制作反射率达到 10^{-4} 量级的抗反镀膜以消除端面的光反馈,抑制半导体激光器的张弛振荡,从而获得平坦的调制响应^[19]。应用于光电子器件中的抗反镀膜可以分为单层膜结构和多层膜结构。其中,单层抗反膜结构简单,制作容易,但是必须同时精确控制薄膜的折射率与厚度才能够达到理想的抗反效果。前文提到,实际制作的单层抗反镀膜的重复性较差^[20]。相对于单层膜而言,多层膜结构具有较强的鲁棒性,能够在较大的带宽范围内实现良好的抗反特性。所以,为了加强抗反射镀膜的工艺可重复性,同时针对半导体光放大器、集成光源等光电子器件对大带宽的要求,本章采用多层抗反射镀膜的技术进行光反馈的抑制。

本章的内容按如下方式组织:2.2 节针对影响 SiN_x 材料折射率的因素进行了实验研究,确定了适合于多层抗反膜镀膜的大折射率差 $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ 材料的沉积条件;2.3 节根据材料的折射率性质,通过理论计算对多层膜 $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ 抗反镀膜的结构参数进行了优化设计;2.4 节在此基础上,对 F-P 激光器端面进行了多层抗反镀膜的实际制作,并采用调制指数法确定其抗反射性能。

2.2 实验条件研究

PECVD 具有反应气体简单、灵活性高、沉积温度较低、沉积速率快等特点^[21-22],是进行 SiO_2 及 SiN_x 等薄膜材料制备的重要技术手段。在本研究中,我们采用 PECVD 沉积的 $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ 材料进行多层膜制作。与传统的电子束蒸发工艺相比,采用 PECVD 进行抗反镀膜的制作,具有工艺简单的优势。

为提高多层膜的抗反效果,要求使用的两种材料具有较大的折射率差^[23]。PECVD 沉积得到的 SiO_2 薄膜的折射率一般为 1.425 左右,其数值比较稳定,受沉积条件的影响较小。另一方面,PECVD 沉积得到的 SiN_x 有一定程度的氢化现象,其折射率受沉积条件的影响较大^[24]。为了获得具有较大折射率差的 $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$

材料, 我们对影响 SiN_x 材料光学特性的沉积条件进行了系统的实验研究。

在实验中, 我们采用 Oxford Instruments 公司的 Plasmalab 80plus 型 PECVD 设备, 使用稀释的 SiH_4 气体 (SiH_4 与 N_2 的比例为 5%:95%) 与 NH_3 气体作为反应气在 InP 衬底上进行 SiN_x 薄膜的沉积, 并利用 Sopra 公司的 GES5 型椭圆偏振光谱仪对沉积薄膜的折射率及厚度进行测量拟合。椭圆偏振测量技术是一种光学无损检测方法, 不但能够测量薄膜材料的厚度, 还能够得到折射率及消光系数随波长的变化规律。在实验中, 我们将折射率测量的中心波长选取为光纤通信常用的 1550 nm 波段。

影响氮化硅薄膜的折射率和沉积速率的因素主要有以下几个方面: SiH_4 和 NH_3 气体流量比、反应温度、腔内压强、射频功率。下面逐一分析各个参数对沉积薄膜特性的影响规律。

2.2.1 SiH_4 和 NH_3 气体流量比的影响

气体流量比是最直接的影响氮化硅薄膜折射率特性的因素, 改变气体流量比可以显著的改变氮化硅折射率。实验条件如下: 射频功率 15 W, 腔内气压 0.8 Torr, 温度 250°C, 时间 12 min。利用椭偏仪测量得到的不同气体流量下薄膜参数如表 2.1 所示:

表 2.1 气体流量比对折射率及沉积速率的影响

序号	SiH_4 流量(注 1) (sccm)	NH_3 流量 (sccm)	折射率 (注 2)	沉积厚度 (nm)
1	90	10	1.760	222
2	90	8	1.786	233
3	90	6	1.830	246
4	120	10	1.819	251
5	120	8	1.846	270
6	120	6	1.884	332
7	120	5	1.913	381

注 1: 实际反应中采用的是 SiH_4 与 N_2 比例为 5%:95% 的稀释 SiH_4 气体。

注 2: 折射率数值选择为光纤通信常用波段 1550 nm 处, 其他波段的变化规律基本类似。

在我们的应用中主要考虑的是折射率特性及沉积速率的问题。图 2.1(a)及图 2.1(b)分别描述的是氮化硅薄膜折射率及沉积速率随 SiH_4 和 NH_3 气体流量比变化的变化趋势。从图中可以看出,随着 SiH_4 和 NH_3 气体流量比的增大,氮化硅薄膜的折射率增加,沉积速度加快。另外,在气体流量比一定的情况下, SiH_4 的流量增大,折射率和沉积速率都随之增加。但是,在 PECVD 沉积过程中,如果 SiH_4 的流量过大,反应过程中会出现粉尘。为保证沉积结果的质量,需要选择适当的 SiH_4 和 NH_3 的流量比及 SiH_4 的流量。

我们采用电子探针能谱仪(EDS)对表 1 中所列序号为 1、3、5 的三个薄膜样品进行了成分分析,得到薄膜中硅、氮元素的原子数比分别为 0.51、0.65、0.72。从 EDS 成分分析结果看出,在 SiH_4 流量基本保持不变的情况下, SiH_4 和 NH_3 气体流量比越大,沉积薄膜的硅含量越高。另一方面,在保持气体流量比不变的情况下, SiH_4 流量越大,沉积得到的氮化硅薄膜中硅的含量也越大。在这两种情况下,薄膜的折射率均随着硅含量的增大而增大。

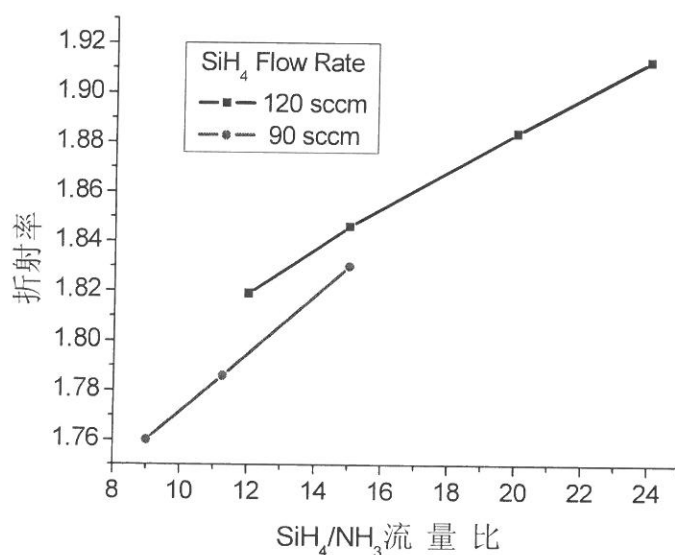


图 2.1(a) 氮化硅折射率随气体流量比的变化曲线

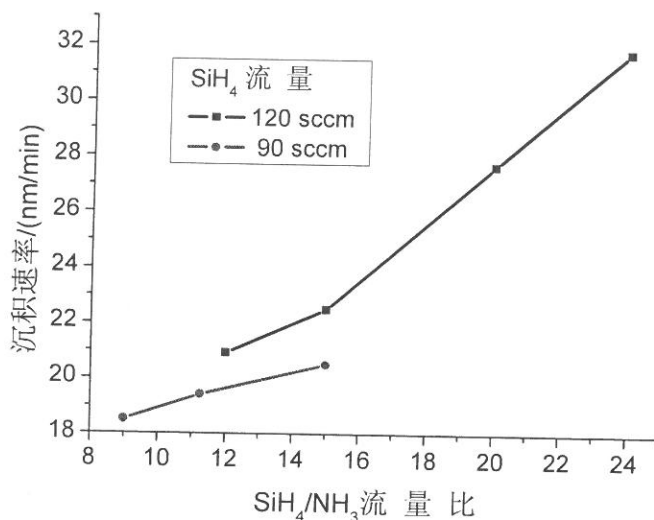


图2.1(b) 氮化硅沉积速率随气体流量比的变化曲线

2.2.2 温度的影响

PECVD 能够实现较低温度的薄膜沉积，一般氮化硅的沉积温度在 400°C 以下，有利于避免光电子器件受到高温影响。表 2.2 所示为实验中沉积温度与氮化硅薄膜折射率及沉积厚度的关系，其他实验条件为： SiH_4 和 NH_3 的流量比为 10sccm/90sccm，射频功率 15 W，腔内压强 0.8 Torr，时间 12 min。

表 2.2 温度对折射率及沉积速率的影响

序号	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	折射率	厚度 (nm)
1	150	1.717	251
2	200	1.739	238
3	250	1.768	229
4	300	1.780	217
5	350	薄膜表面起伏严重	

如图 2.2 所示，沉积温度升高时，氮化硅薄膜的折射率增大，而沉积速率有所降低。这是因为在 PECVD 沉积过程中，温度越高，腔内活性分子越多，能量越大，沉积得到的氮化硅也越致密，从而表现为折射率增加而沉积速率降低。但是温度升高到一定程度后（ 350°C ），沉积分子的能量太大，薄膜沉积不均匀，

有明显的条纹产生，导致沉积薄膜的质量受到严重影响^[25]。所以，要选择合适的氮化硅沉积温度，一般选择在 300°C 以下为宜。

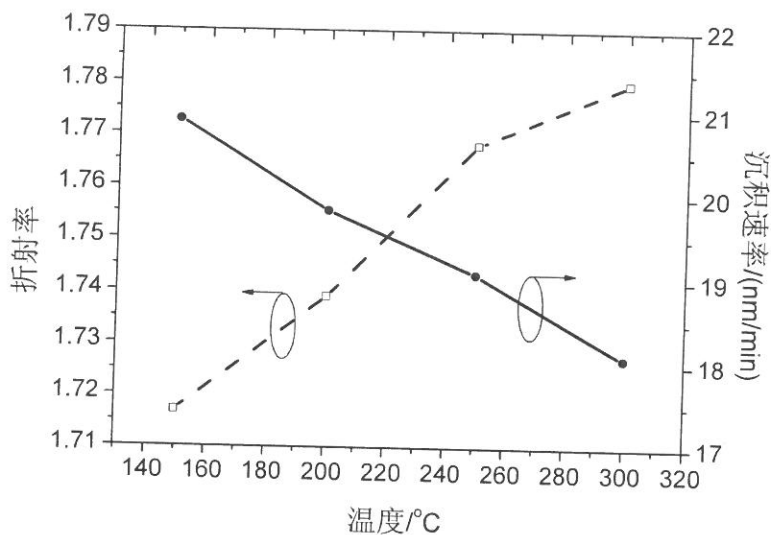


图2.2 氮化硅折射率及沉积速率随腔内温度的变化曲线

2.2.3 反应室压强的影响

反应室的压强对于沉积的氮化硅薄膜特性也有较大影响。表 2.3 所示为腔内反应压强与沉积薄膜折射率及沉积厚度的关系。其他实验条件为： SiH_4 和 NH_3 的流量比为 10 sccm/90 sccm，射频功率 15 W，温度 250°C，时间 12 min。

表 2.3 反应压强对折射率及沉积速率的影响

序号	压强 (Torr)	折射率	厚度 (nm)
1	0.4	1.784	158
2	0.8	1.774	209
3	1.2	1.761	271
4	1.6	1.756	346

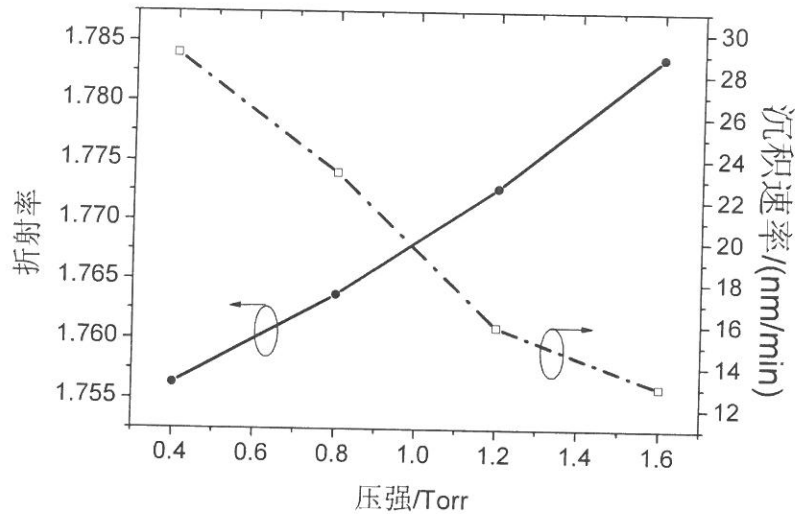


图2.3 氮化硅折射率及沉积速率随腔内反应压强的变化曲线

将表 2.3 中数据整理绘成图 2.3 可以看出，随着反应腔内压强增大，沉积的氮化硅薄膜的折射率降低，沉积速度增大。这是由于压强较低时，腔内反应气体较少，沉积速率低。当反应室压强升高时，薄膜沉积速率随之提高，而折射率略有降低。但过高的沉积速率有可能导致沉积结果的均匀性发生恶化。同时，在高压强下沉积得到的薄膜不够稳定^[26]。

2.2.4 射频功率的影响

表 2.4 所示为射频功率与沉积薄膜折射率及沉积厚度的关系，其他实验条件为： SiH_4 和 NH_3 的流量比为 10sccm/90sccm，温度 250°C ，腔内反应压强 0.8 Torr，时间 12 min。

表 2.4 射频功率对折射率及沉积速率的影响

序号	射频功率 (W)	折射率	厚度 (nm)
1	10	1.791	164
2	15	1.771	216
3	20	1.764	273
4	30	1.786	347
5	40	1.779	407
6	50	1.778	444

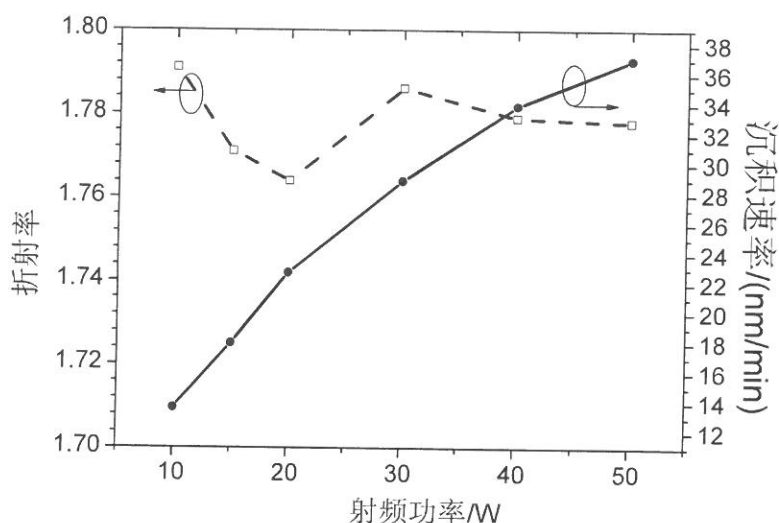


图2.4 氮化硅折射率及沉积速率随射频功率的变化曲线

从图 2.4 中可以看出, 射频功率对氮化硅的沉积速率影响较大, 沉积速率随射频功率增大。同时, 氮化硅薄膜的折射率并不是随着射频功率的改变而单调变化。但总体来看, 射频功率对薄膜折射率的影响较小。

2.2.5 实验条件选择

根据已有的文献报道^[27]及我们的实验研究结果, 在反应气体流量比、射频功率、腔内压强、以及沉积温度等诸多沉积条件中, SiH_4/NH_3 流量比及 SiH_4 的流量是影响 SiN_x 薄膜折射率的最直接也是最显著的因素。同时, 射频功率对 SiN_x 薄膜的沉积速率具有较大的影响。

综合考虑以上沉积参数对 SiN_x 折射率、沉积速率、薄膜沉积质量的影响, 我们选择在 SiH_4 流量 120 sccm、 SiH_4/NH_3 流量比为 24、射频功率 15 W、沉积温度 250°C 、腔内压强 0.8 Torr 的条件下进行沉积, 得到的 SiN_x 薄膜的沉积速率为 0.53 nm/s, 折射率为 1.920。另一方面, SiO_2 薄膜的沉积参数选择如下: 气体流量 $\text{N}_2\text{O}/\text{SiH}_4 = 355 \text{ sccm}:85 \text{ sccm}$ 、射频功率 20 W, 沉积温度 250°C , 工作压力 1 Torr, 得到的 SiO_2 薄膜沉积速率为 1.1 nm/s, 折射率 1.425。可以看出, 在以上沉积条件下得到的 SiN_x 薄膜与 SiO_2 薄膜具有较大的折射率差。这样, 我们就得到了进行多层抗反射镀膜的两种基本材料的特性。

2.3 多层膜的设计

基于以上实验得到的 $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ 材料, 根据我们的计算分析, 无法通过采用两层或三层结构实现具有足够带宽及鲁棒性的抗反膜。因此, 我们选择四层抗反膜进行设计, 其结构如图2.5所示。

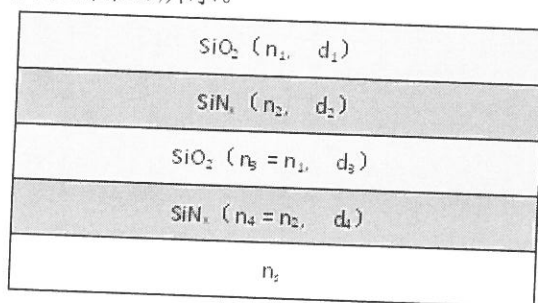


图2.5: 四层抗反膜结构图

多层膜的反射率 R 可以根据薄膜系统的光学导纳进行计算^[28]:

$$R = \left| \frac{Y - n_0}{Y + n_0} \right|^2 \quad (2-1)$$

其中, n_0 为空气的折射率, Y 为由以下公式给出的薄膜系统光学导纳:

$$Y = C/B \quad (2-2)$$

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left(\prod_{r=1}^N \begin{bmatrix} \cos \delta_r & (i \sin \delta_r) / n_r \\ i n_r \sin \delta_r & \cos \delta_r \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} 1 \\ n_s \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

在以上公式中, $\delta_r = 2\pi n_r d_r / \lambda$ 。这里, λ 为光波波长, n_r 和 d_r 分别为第 r 层薄膜的折射率和厚度。

对于单层膜而言, 抗反特性最佳的薄膜厚度为 $\lambda_0/4n$, 对于多层膜, 为了进行充分的比较分析, 需要选取一个比较大的范围进行计算。为此, 我们选取各层膜的厚度范围为 $0 \sim 0.5\lambda_0$, 并定义各层膜的厚度为:

$$d_r = m_r \times 0.5\lambda_0 \quad (0 < m_r \leq 1) \quad (2-4)$$

同时, 为了保证多层薄膜系统具有足够的抗反特性, 要求光学导纳 Y 满足以下条件:

$$\begin{cases} |\text{Re}(Y - n_0)| \leq \Delta \\ |\text{Im}(Y - n_0)| \leq \Delta \end{cases} \quad (2-5)$$

其中, Δ 为失谐系数。在我们的计算中, 取 $\Delta = 0.01$ 。

确定各层膜厚参数 m_i 的计算流程图如图2.6所示:

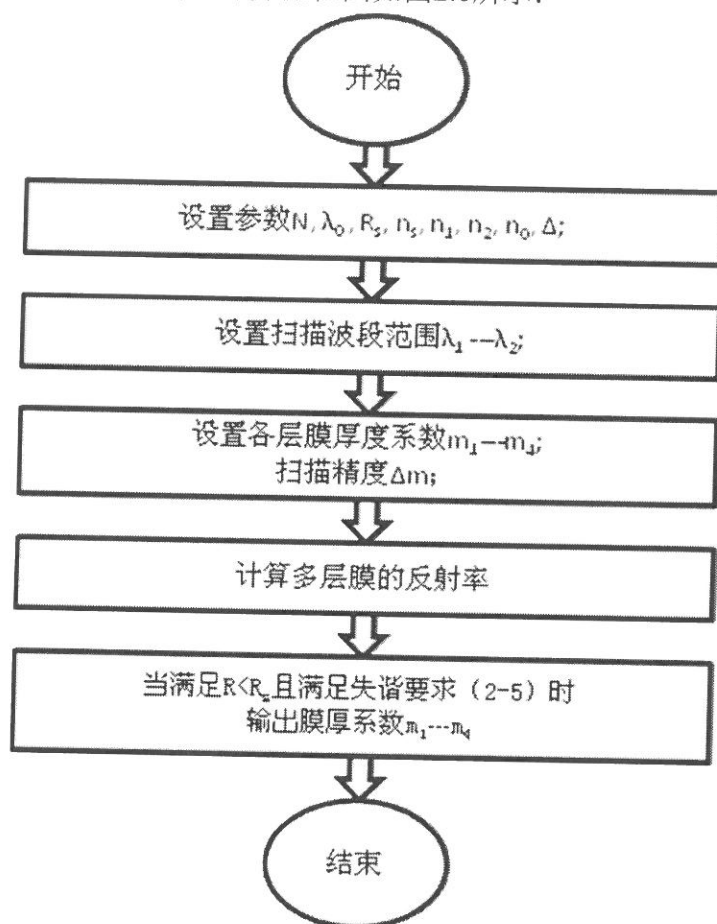


图2.6: 确定多层膜膜厚参数的计算流程图

以半导体激光器的端面抗反镀膜为例, 我们根据表2.5中设定的各个计算参数值对多层膜的抗反特性进行了计算仿真, 得到如表2.6所示五组满足反射率要求的膜层结构参数, 相应的多层抗反膜的反射率曲线如图2.7(a)所示。可以看出, 得到的几组膜厚值都能够在较宽的波长范围内实现低于 10^{-4} 的反射率。

表 2.5: 多层膜仿真计算参数

参数	描述	数值
N	膜层数	4
λ_0	中心波长	1550 nm (半导体激光器输出波长)
n_s	基底有效折射率	3.215 (InGaAsP 半导体激光器的有效折射率)
n_1	SiO ₂ 折射率	1.425

n_2	SiN _x 折射率	1.920
n_0	媒质(空气) 折射率	1
R_s	需要达到的最大反射率	10^{-4}
Δ	失谐系数	0.01

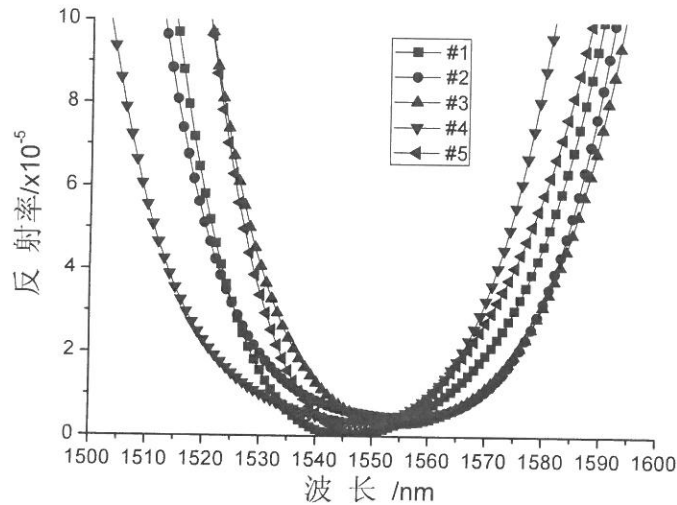
为提高计算效率,膜厚参数 m_i 的扫描精度设定为 $\Delta m = 0.01$,由此得到的反射率曲线的中心波长与设定的中心波长1550 nm有所偏离。设 λ_s 为计算得到反射率曲线的中心波长,而 $\lambda_0 = 1550$ nm为要应用的中心波长,通过引入因子:

$$k = \frac{\lambda_0}{\lambda_s} \quad (2-6)$$

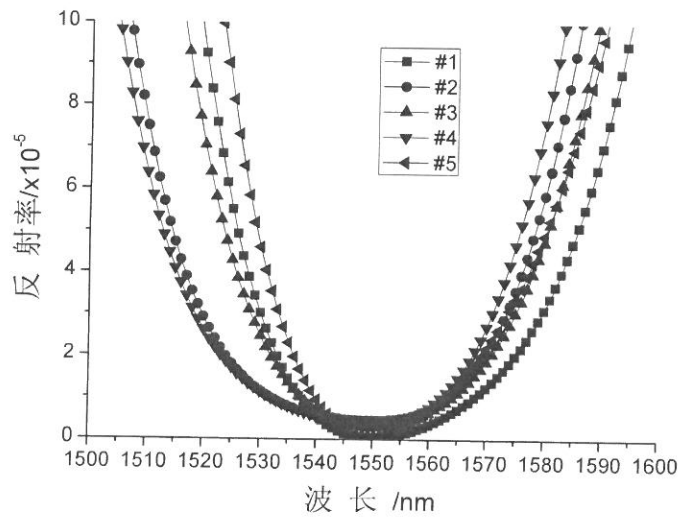
将膜厚系数 m_i 调整为 $m'_i = km_i$,即可将多层薄膜反射率曲线中心波长调整至 λ_0 。将表2.6所示的各组数据经公式(2-6)进行中心波长重置,得到的反射率曲线如图2.7(b)所示。经过调整,中心波长1550 nm处的反射率达到最优,且能够在70 nm的波长范围内保证低于 10^{-4} 的反射率。

表 2.6: 满足反射率及失谐要求的各层膜的厚度系数:

No.	中心波长调整前				中心波长调整后			
	m_1	m_2	m_3	m_4	m'_1	m'_2	m'_3	m'_4
#1	0.33	0.83	0.37	0.25	0.331	0.833	0.371	0.251
#2	0.33	0.84	0.31	0.27	0.329	0.837	0.309	0.269
#3	0.34	0.83	0.29	0.28	0.339	0.828	0.289	0.279
#4	0.37	0.72	0.39	0.25	0.370	0.721	0.390	0.250
#5	0.37	0.76	0.31	0.28	0.371	0.761	0.311	0.280



(a) 中心波长调整前



(b) 中心波长调整后

图2.7: 计算得到的各组数据对应的反射率

我们对调整后的膜厚参数进行了鲁棒性分析,发现单层膜厚度变化在 ± 5 nm以内时,中心波长1550 nm处的反射率均能保持低于 5×10^{-4} 。根据我们对 SiN_x 及 SiO_2 薄膜沉积速率稳定性的实验分析结果,采用PECVD进行多层抗反膜的沉积制作具有足够的可控性,能够很好的控制薄膜厚度以满足我们的应用要求。

2.4 抗反射镀膜特性评测

为了验证计算结果,我们选取表2.6中的第一组数据对F-P半导体激光器的端面进行了抗反镀膜试验。我们根据各层膜厚度参数 m_i 计算出实际膜厚,并依据 SiO_2 及 SiN_x 薄膜的沉积速率控制PECVD的沉积时间,将 $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ 多层膜沉积到F-P半导体激光器的端面上。

我们采用Kaminow等人提出的调制指数法对F-P激光器端面多层抗反膜的反射率进行了测量^[29]。图2.8所示为镀膜前后,F-P激光器在相同的注入电流下的自发辐射光谱。

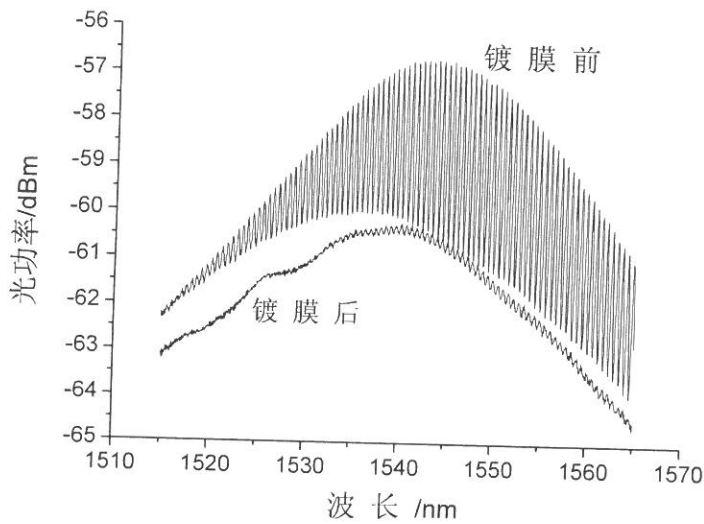


图2.8: F-P激光器镀膜前后的自发辐射谱

定义调制指数为:

$$m = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max} + P_{\min}} \quad (2-7)$$

其中 $P_{\max}$ 、 $P_{\min}$ 分别为自发反射谱的峰值和谷值。调制指数 m 与半导体激光器环路增益因子 a 的关系为:

$$m = \frac{2|a|}{1+|a|^2} \quad (2-8)$$

通过测量镀膜前后同一电流下的自发辐射光谱,可以得到镀膜前后的环路增益因子 a 及 a' ,而根据F-P激光器的增益特性则可以得到:

$$\frac{|a|^2}{|a'|^2} = \frac{R_2}{R_2'} \quad (2-9)$$

其中 R_2 与 R_2' 分别为镀膜前后的激光器端面反射率。镀膜前F-P激光器端面的反射率约为0.3，由此得到多层抗反镀膜在1550 nm处的反射率为： 5.7×10^{-4} 。

我们根据测得到的F-P激光器镀膜前后的自发辐射光谱计算了四层抗反膜在各个波长的反射率，如图2.9所示。从图中可以看出，在所测量的1535-1565 nm范围内，四层抗反膜的反射率均保持在 10^{-4} 量级。

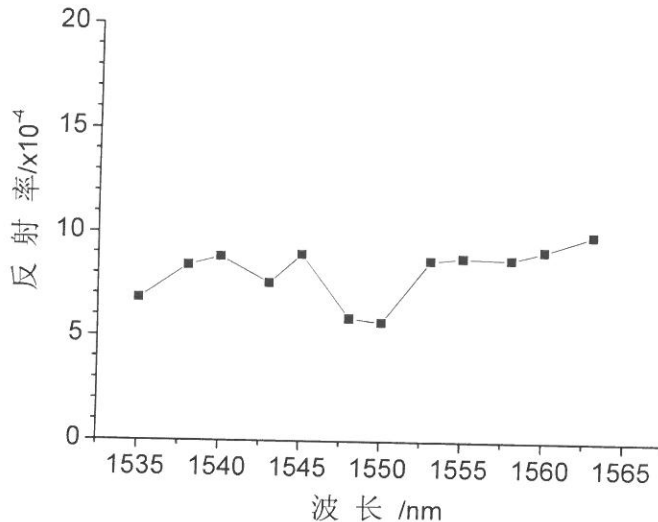


图2.9：根据光谱计算四层抗反膜的反射率

由于实验中采用的PECVD设备不能对薄膜沉积厚度进行实时监测，因此各膜层的实际厚度与设计值之间存在一定误差。为了进一步改善抗反镀膜的特性，可以优化沉积条件以加大 SiN_x 与 SiO_2 材料的折射率差，从而改善多层膜制作的鲁棒性。在半导体光放大器或集成光源管芯制作中，达到 10^{-4} 量级的反射率已经能够满足应用要求。实验结果表明，基于PECVD沉积 $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ 多层抗反膜的方案完全可以应用于这些光电子器件的制作。

2.5 本章总结

本章首先细致的分析了 PECVD 沉积的各种条件：反应气体流量比、射频功率、腔内压强、以及沉积温度对沉积 SiN_x 薄膜折射率及沉积速率的影响，实验发现 SiH_4/NH_3 流量比及 SiH_4 的流量是影响 SiN_x 薄膜折射率的最直接也是最显著

的因素；同时，射频功率对 SiN_x 薄膜的沉积速率具有较大的影响。经过对实验因素的分析确定了能够获得大折射率差 $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ 多层薄膜材料的沉积条件，适合于多层抗反射镀膜，并通过椭偏仪拟合测量得到了材料特性。

基于得到的 SiO_2 及 SiN_x 材料特性，提出一种基于 PECVD 沉积 $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ 多层膜的抗反射镀膜制作技术。根据理论计算，设计了基于 PECVD 沉积 $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ 薄膜的四层抗反膜结构，能够在以 1550 nm 中心波长附近较大波长范围内实现 $<10^{-4}$ 的反射率。在此基础上，对 F-P 激光器端面进行了 $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ 多层抗反镀膜，并通过对镀膜前后自发辐射光谱的测量，确认在 1535 ~ 1565 nm 波段内多层膜的反射率均达到了 10^{-4} 量级。

依据文献报道及实验室的前期工作的经验，抗反射镀膜反射率达到 10^{-4} 量级就能够取得良好的抑制张弛振荡的效果。本论文中采用的多层抗反射镀膜，在试验工艺上较之前方法具有工艺简单，稳定性和可重复性好的特点，并且取得良好的抗反射效果，能够满足集成光源抗反射镀膜制作的需要。

第3章：集成光源模块封装及其性能测试

3.1 本章引论

为了实现 DFB+EA 集成光源的实用化, 需要对其进行封装。集成光源的封装主要分为管芯级封装和模块级封装, 本章针对集成光源封装工艺及后续的测试进行了较为细致完整的研究。

管芯级封装是对集成光源管芯进行初步的焊接处理以方便测试, 从而便于评测集成光源管芯的性能。在实际的焊接中, 将管芯焊接在微波热沉上, 采用金线将 EA 调制器与具有阻抗匹配的微波馈线进行连接, 使得在测试时, 微波信号通过微波馈线加载在 EA 调制器上, 实现对 DFB 激光器输出光的调制。输出的调制光信号通过耦合光纤, 经光探测器重新转换为微波信号, 利用网络分析仪对输出和输入的微波信号进行分析, 便可评测管芯器件的小信号调制特性。模块级封装是在管芯级封装的基础上, 实现各种功能模块在内的集成封装, 其中包括了从外部同轴接口到管芯调制器电极连接的微波馈线, 功率控制和温度控制的模块, 以及光纤耦合模块等。图 3.1 为典型的模块封装示意图。

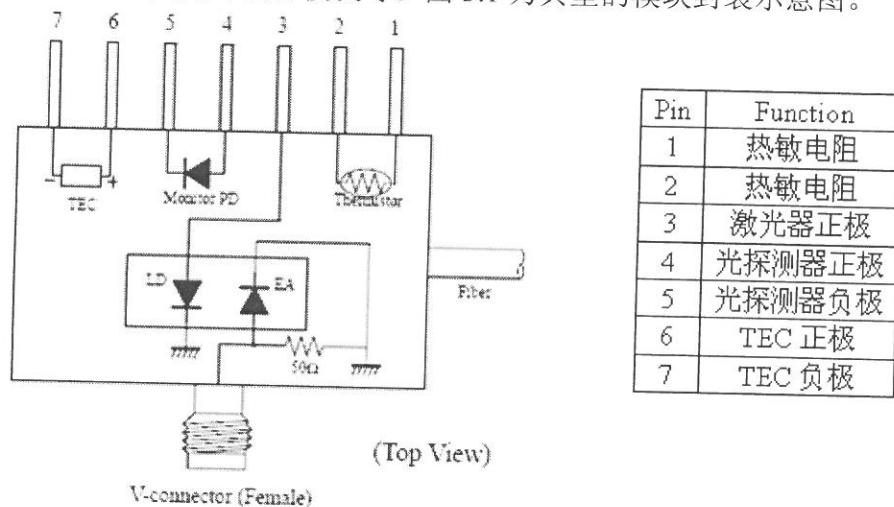


图 3.1 集成光源模块结构示意图

在本论文中, 采用日本京瓷 (Kyocera) 公司生产的 40 Gb/s 蝶形封装管壳进行集成光源模块封装, 该管壳使用 V 型接头用于微波调制信号输入, 管壳结构及尺寸如图 3.2 所示^[30]。

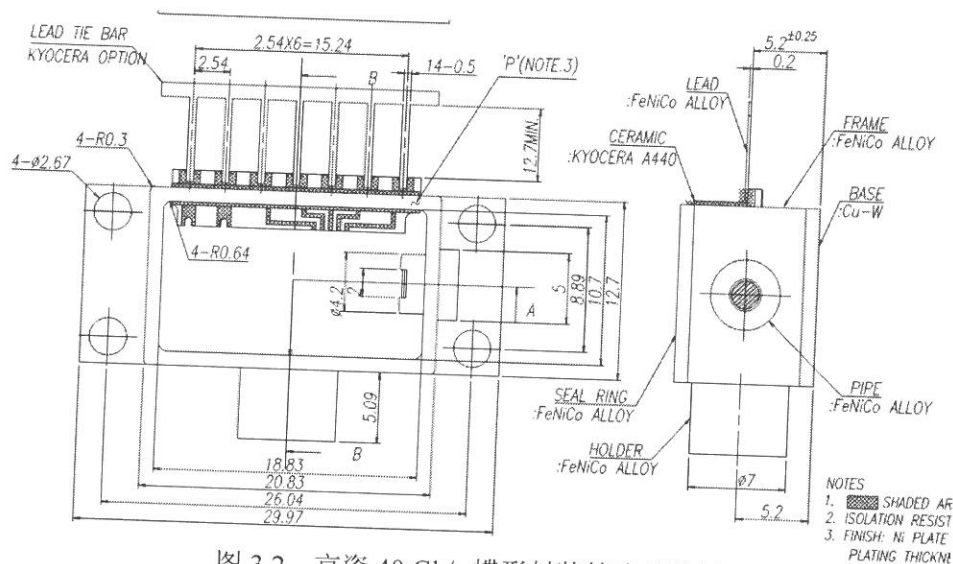


图 3.2 京瓷 40 Gb/s 蝶形封装管壳结构图

在模块封装的设计中，主要考虑一下几个基本问题：V 接头与微波馈线的连接，要注意焊点的控制以免对微波传输造成影响；微波馈线的设计有利于模块的封装及测试；微波馈线与 EA 调制器的金丝键合要方便实现；对 DFB+EA 集成光源管芯的温度进行有效的控制（热敏电阻要靠近管芯，同时要考虑管芯的散热问题）。

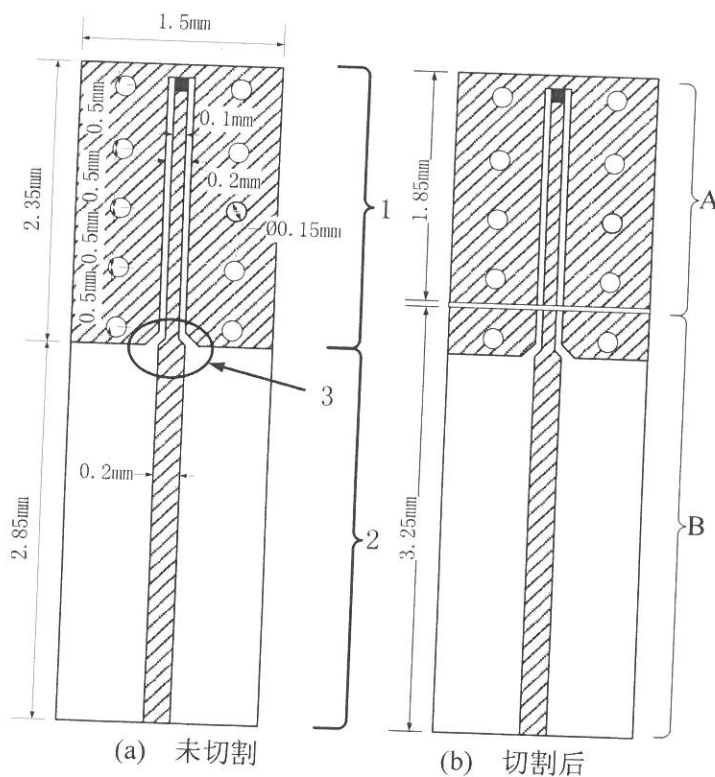


图 3.3 微带线转共面波导微波传输线结构图

以上的因素中最主要为微波馈线的设计。在实验室前期工作中,设计了如图 3.3 所示的微波馈线。实际封装中采用的是分割后的结构,主要是为了便于管芯级封装及之后的测试。采用微带线的形式有利于微波馈线与 V 接头的连接。

根据已有的管壳结构及设计完成的微波馈线结构,设计了如图 3.4 所示的集成光源封装结构图。组件包括:管壳、L 型支撑架、微波封装用微波馈线、TEC、完成管芯级封装集成光源。

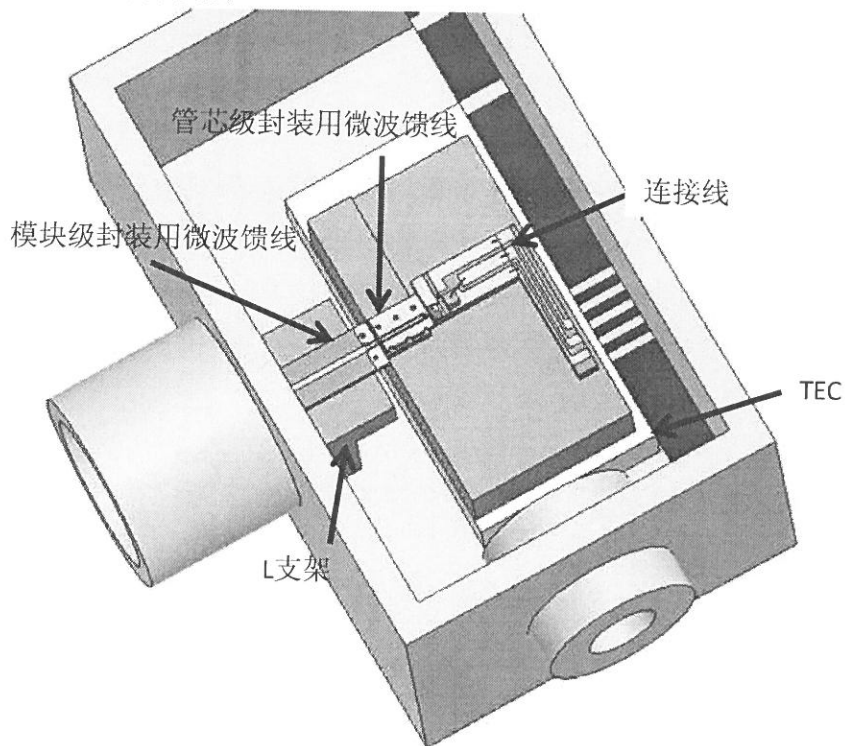


图 3.4 集成光源模块封装结构示意图

本章剩余部分按照如下方式组织: 3.2 节主要进行管芯级封装的及集成光源的小信号调制响应测试; 3.3 节进行集成光源的模块化封装及其小信号调制响应及大信号传输眼图测试; 3.4 节对本章进行总结。

3.2 管芯级封装工艺及小信号调制响应测试

3.2.1 管芯级封装工艺及遇到的问题

管芯级封装主要分为以下几个步骤^[10]:

(1) 管芯及热敏电阻焊接到 AlN 热沉上: 采用 West Bond 公司生产的 7316C 单头贴片机对样品进行共晶焊接。采用共晶温度 280°C 的 $\text{Au}(80\%)\text{Sn}(20\%)$ 焊料, 将管芯与热敏电阻分别共晶焊接到氮化铝热沉上, 如图 3.5(a) 所示。应该将管芯尽量安装在靠近右下角的位置, 这样可以缩短连接管芯封装微带线与 EA 调制器电极的金线; 而热敏电阻应该尽量安装在靠近管芯的位置, 这样可以更加准确的反映管芯的温度, 以便更好控制管芯的温度。

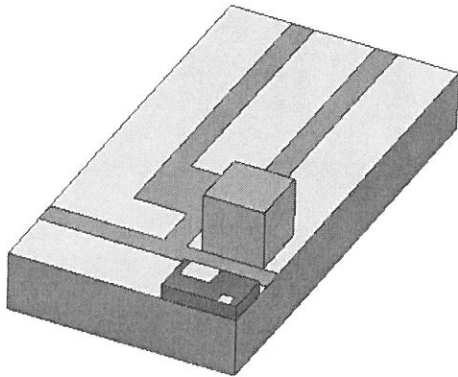


图 3.5(a) 管芯与热敏电阻安装示意图

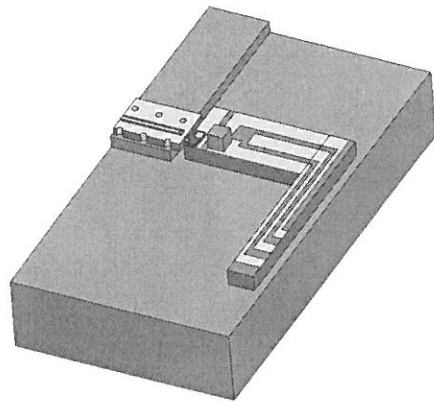


图 3.5(b) 各组件安装示意图

图 3.5 管芯级封装步骤

(2) 管芯封装各元件安装到 TEC 支撑架上: 将管芯级封装用的微波馈线焊接到 TEC 支撑台上, 使用 SnPb 焊料, 其标定熔点为 183°C , 调整微波馈线的位置, 如图 3.5(b) 所示, 使其在 TEC 支撑台上方小台子的右边, 并且与支撑台的边对齐, 同时要主要焊料的厚度, 要使微波馈线安装平整。

将已经安装了管芯与热敏电阻的氮化铝热沉安装到 TEC 支撑台上, 同样使用 SnPb 焊料。应该尽量减小 EA 调制器金属电极与微波馈线信号电极的距离, 使 EA 电极处于微波馈线信号电极的延长线上。将氮化铝连接线安装到 TEC 支撑台上, 使用 SnPb 焊料, 如图 3.5(b) 所示, 要保证氮化铝连接线的电极与氮化

铝热沉上面的电极位置相对应。

(3) 各电极间引线的连接: 我们采用 West Bond 公司生产的 7476D 楔型压焊机进行金线键合, 金线直径 $25\text{ }\mu\text{m}$ 。键合参数如下: 超声功率 500 (机器内部参数), 超声时间 50 ms, 衬底加热温度 110°C 。如图 3.6 所示, 我们使用楔形压焊机连接微波馈线信号电极与 EA 调制器电极, DFB 激光器电极, 热敏电阻电极, 同时将氮化铝连接线的电极与氮化铝热沉相应的电极使用金线键合。

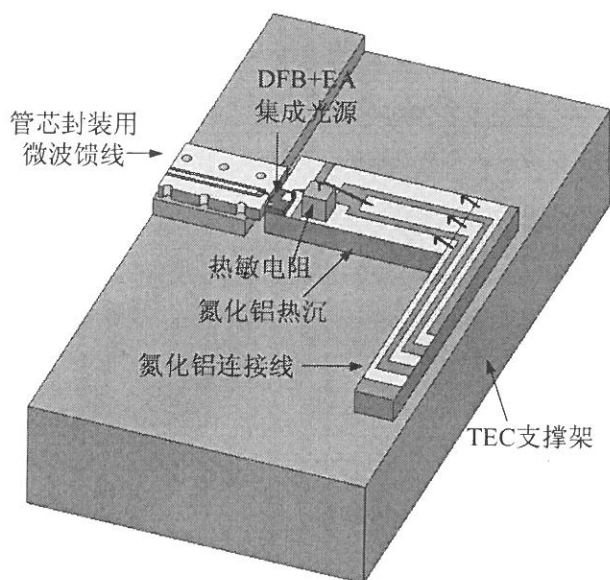


图 3.6 管芯级封装结构图

按照设计好的封装方案, 我们进行了器件的管芯级封装, 在对器件进行小信号调制响应测试后, 得到如图 3.7 所示的响应曲线。在考虑了微波谐振问题的基础上, 意外的发现, 在高频阶段 28-30 GHz 依然存在着谐振现象。

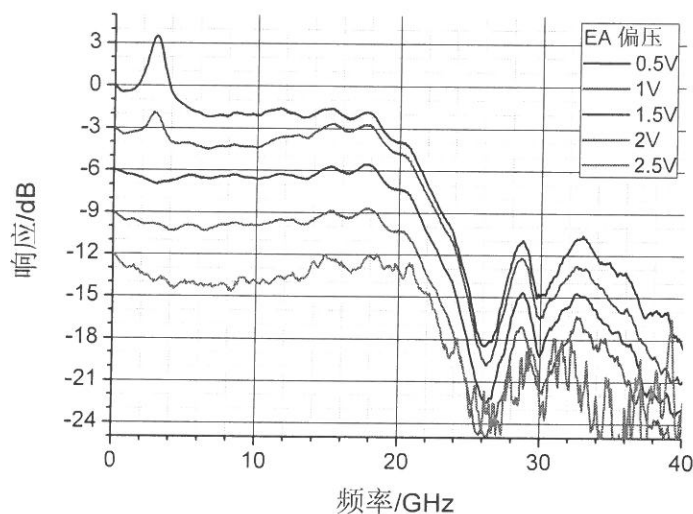


图 3.7 管芯的小信号调制响应曲线

经过分析发现,在如图 3.5(a)所示的管芯封装方案的设计中,并没有考虑到集成光源管芯与微波共地的问题。为了解决这个问题,在开始封装之前,采用磁控溅射的方式,在热沉的侧面溅射一层金,实现了管芯地电极与金属铜块的连接,从而保证了集成光源管芯与管壳共地,解决微波共地问题。改进后的结构示意图如图 3.8 所示。

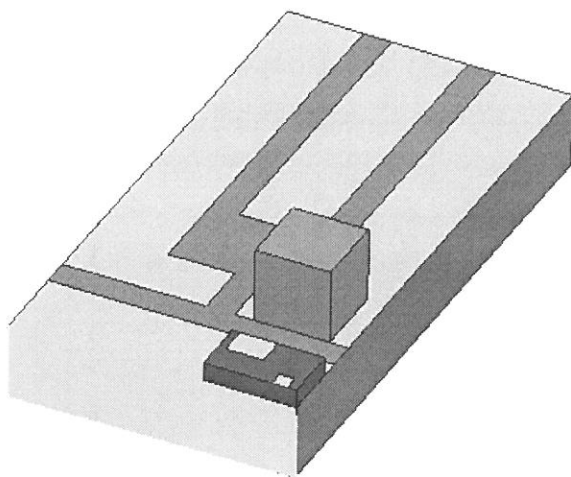


图 3.8 进行侧面接地处理后的管芯焊接结构示意图

综合考虑各种因素,我们制作了如图 3.9 所示的两种封装模式的实物照片:

其中图 3.9(a)所示为我们设计的基本模式,即微带线为单匹配电阻,管芯放置在 AlN 热沉上,与微带线分开;图 3.9(b)所示结构对基本模式进行调整,采用双匹配电阻,这样可以使得 EA 连接线尽可能的短。在 3.2.2 小节,我们会对这两种封装模式的小信号调制响应进行测试及分析。

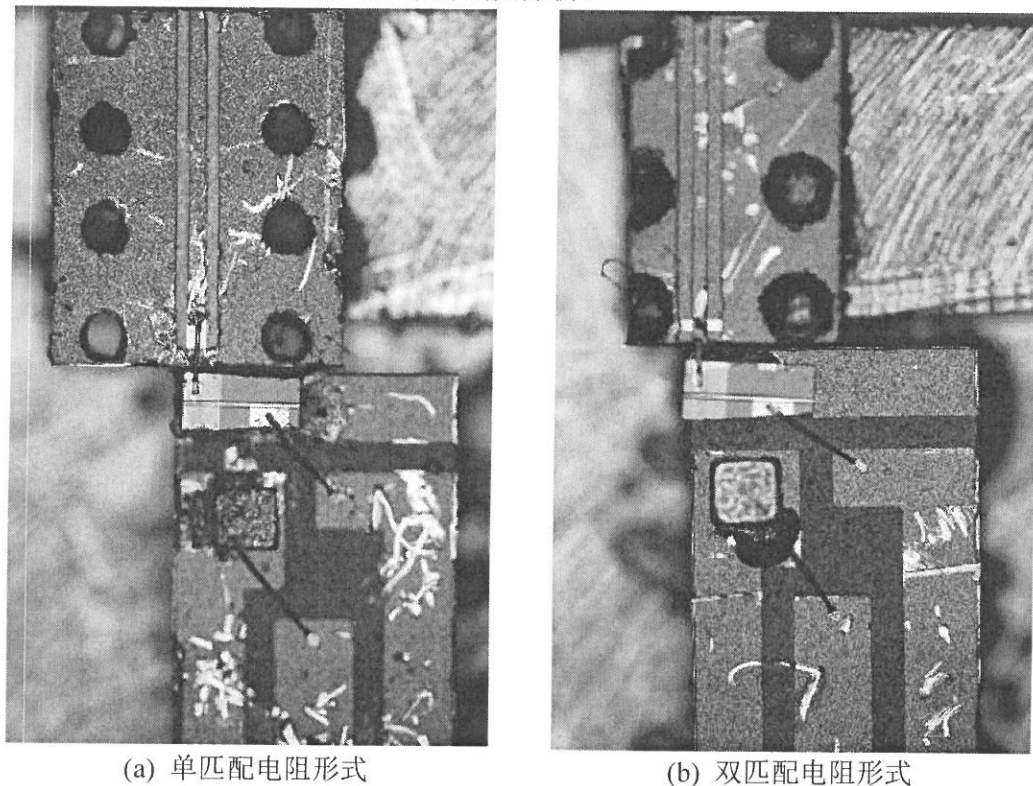


图 3.9 集成管芯模块封装中的传输线照片

3.2.2 小信号调制响应测试及分析

我们采用图 3.10 所示的测试系统对管芯级封装后的集成光源进行小信号调制响应测试。

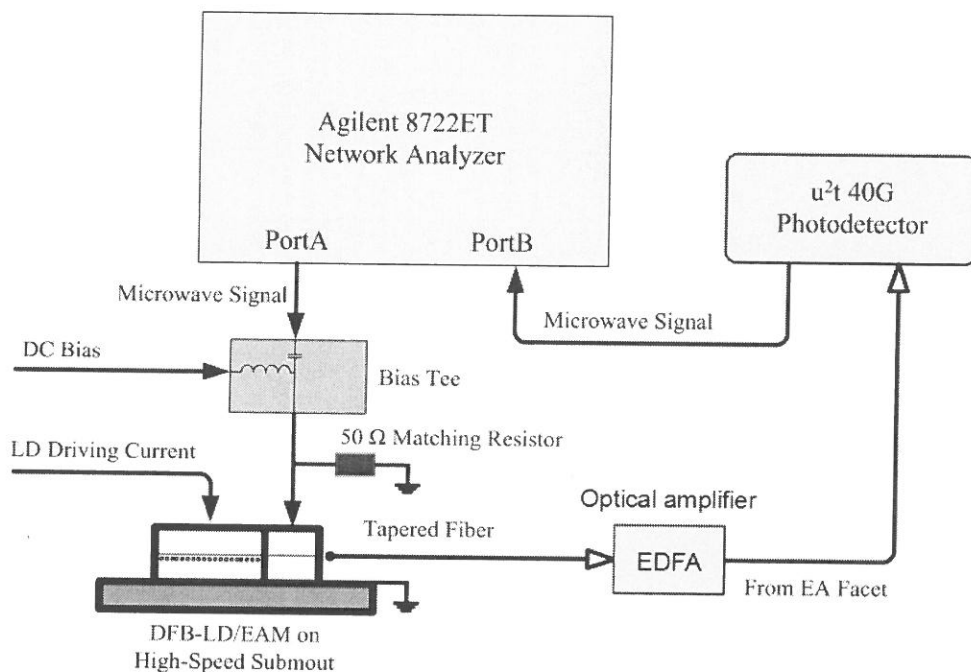
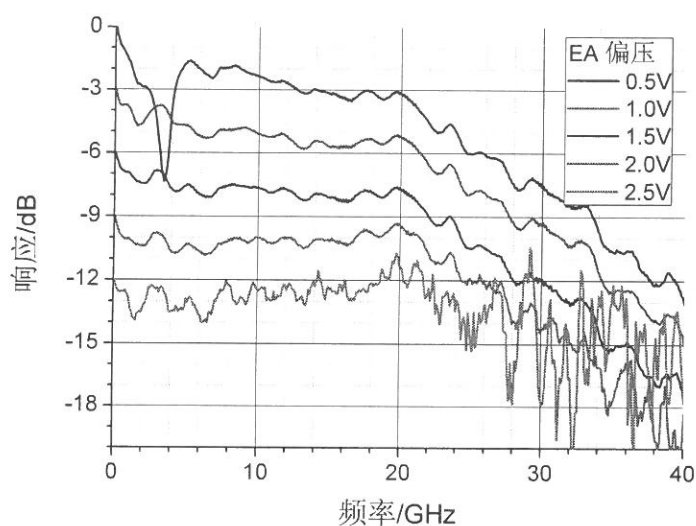


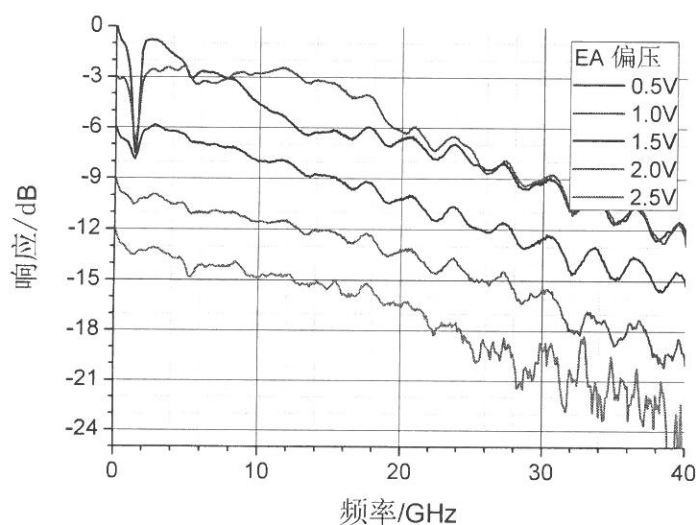
图 3.10 管芯级封装集成光源的小信号调制带宽测试系统

实验中, Agilent 8722ET 网络分析仪 Port A 端口输出的微波信号通过 Cascade ACP40 型微波探针加载到微波馈线共面波导的输入端, 经管芯封装用微波馈线耦合到集成光源的调制器电极, 形成对激光器输出光的调制。同时, 直流反向偏置电压通过 Bias-Tee 加载到 EA 调制器电极上。调制后的光信号经拉锥光纤耦合输出, 经过 EDFA 放大后进入 u^2t 40 GHz 高速光电探测器, 转换为微波信号后返回网络分析仪 Port B 端口, 从而得到器件的频率响应曲线。

我们对图 3.9 所示的两种结构进行了测试, 其相应曲线如图 3.11(a), 3.11(b) 所示。经过对比分析, 我们发现双匹配电阻封装模式 3dB 带宽能够到达 22 GHz 左右, 单匹配电阻封装模式 3dB 带宽能够到达 30 GHz 左右, 但是在高频阶段, 单匹配电阻封装响应下降的很快, 而双匹配电阻封装模式响应曲线下降的稍缓。



(a) 单匹配电阻封装模式管芯小信号调制响应曲线



(b) 双匹配电阻封装模式管芯小信号调制响应曲线

图 3.11 管芯级封装后小信号调制响应测试

经过分析发现，单匹配电阻的引线长度约 $700\ \mu\text{m}$ ，双匹配电阻的引线长度约 $300\ \mu\text{m}$ ，由于引线电感的不同，导致这两种封装模式响应曲线的差别。图 3.12 所示为仿真分析引线电感对管芯小信号调制响应曲线影响，通过仿真曲线可以容易看出，引线较长时，低频阶段比较平稳，3dB 带宽会略有增加，但是高频段的调制响应急速下降；而当引线较短时，在 0-40 GHz 的整个频段内，下降比较

平稳, 3 dB 带宽受到限制, 但是在高频段的调制响应会表现比较平稳的特性。

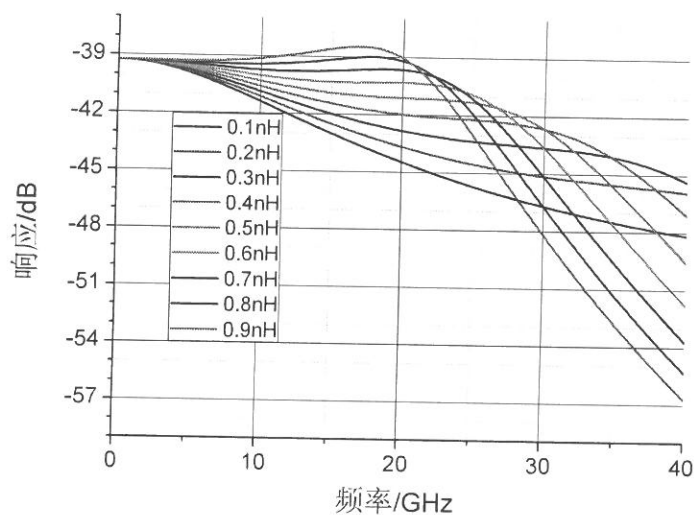


图 3.12 引线电感对小信号调制响应的影响

为了使集成光源管芯达到 40G 的应用要求, 需要小信号调制响应的带宽超过 30GHz, 同时调制响应曲线在高频阶段下降也要比较平缓。我们通过实验发现, 采用以上的封装模式并没有取得十分理想的结果。经过进一步分析, 以上两种封装模式, 如图 3.8 所示, EA 调制器经过了热沉侧面金属接地, 微波共地受到了一定的影响, 可能是导致小信号调制响应不理想的原因, 于是我们对封装结构进行了进一步的改进。

3.2.3 封装模式的改进及测试

为了改进 EA 调制器的接地特性, 将集成光源管芯放置在微波传输线上, 这样微波共地状况会得到很好的改善, 其结构如图 3.13 所示。

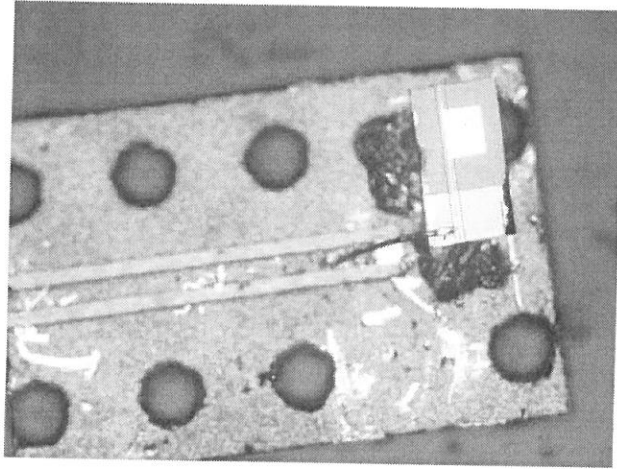


图 3.13 改进的封装结构图

这种封装模式的焊接方式与 3.2.1 节介绍的基本相同，只是管芯放置的位置有所不同而已。在将管芯焊接到微波馈线上之后，进行了小信号调制响应测试。系统结构与图 3.10 所示相同。响应曲线如图 3.14 所示。

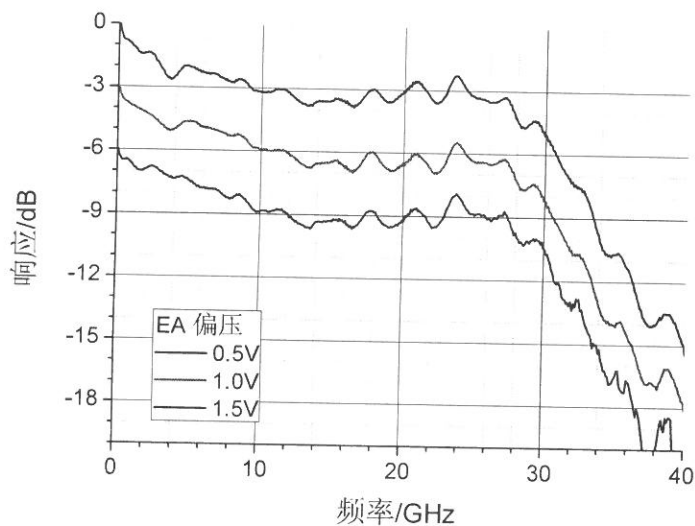


图 3.14 小管芯焊接调制响应曲线

从调制响应曲线可以看出，管芯的 3 dB 带宽在 28 GHz 左右，但是高频阶段下降依然很快。经过分析，我们发现对于这种封装模式，进行测试时，热沉直接放置在测试平台上，接地特性并不是很理想，所以我们将带有管芯的微波馈线焊接到 TEC 支撑架上，其封装模式如图 3.15 所示。

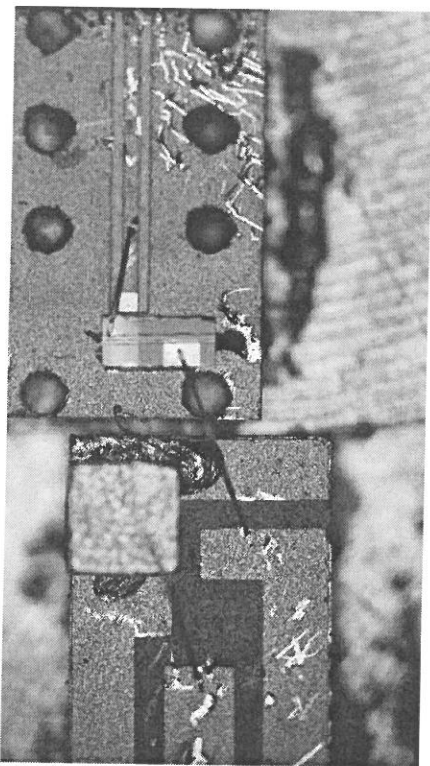


图 3.15 改进后的管芯级封装结构

对这样的管芯级封装模式进行小信号调制响应测试，如图 3.16 所示。

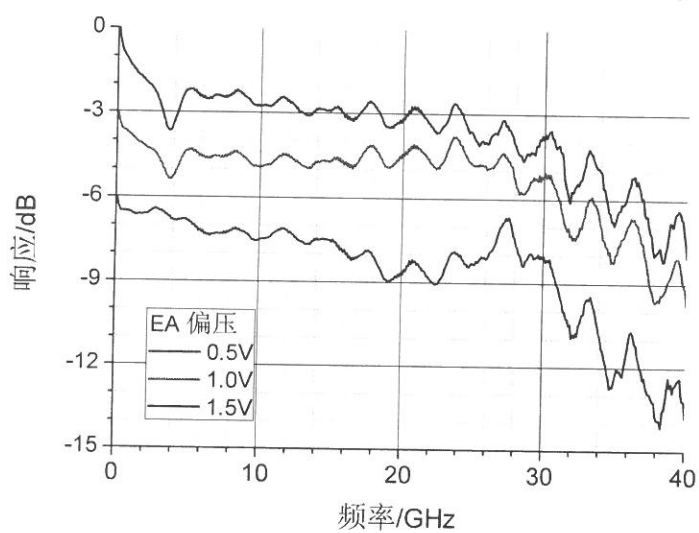


图 3.16 改进后的管芯级封装调制响应曲线

从图中可以看出,经过了管芯级封装,管芯的3 dB带宽达到32 GHz左右,并且在高频区域,响应曲线下降的更加平缓。实验结果表明,集成光源管芯具备良好的性能,所以我们对其进行了模块封装。

3.3 集成光源模块化封装及其性能测试

3.3.1 集成光源模块化封装工艺

在进行管芯级封装测试后,挑选出性能优异的管芯,即可进行集成光源的模块级封装。具体封装工艺步骤如下所示:

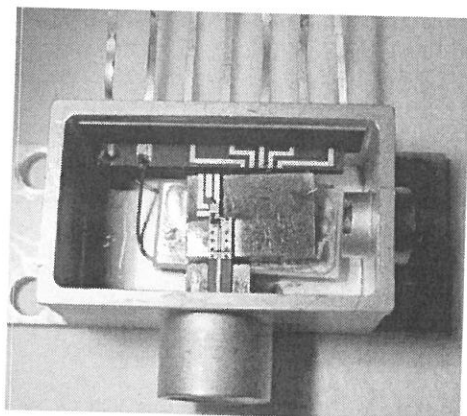
1、安装L型支架:首先将L型支架焊接到V接头下方的中心位置处。由于L型支架是模块封装的第一个焊接元件,为了防止后面的焊接工艺影响其焊接的稳定度,我们选择了熔点较高的SnAgCu(SAC)焊料,其熔点为219°C。以后每一步焊接的焊料熔点逐渐降低,以保证不对前面的焊接步骤造成影响。

2、安装模块封装用微波传输线:首先在焊接好的L型支撑架上安装模块封装用微波传输线,焊接时应注意调整微波传输线的位置使其信号电极在V接头的正下方。焊接时使用的焊料为SnPb焊料,其熔点为183°C。然后用熔点为149°C的SnBi焊料将V接头的芯柱与封装用微波传输线信号电极连接。这一步焊接非常重要,如果焊点过大,将会影响整个模块反射特性。因此在焊接时不能使用过多焊料,只能使用少许焊料使V接头与微带传输线的信号电极连接充分即可,同时要防止将信号电极与传输线地电极相连形成短路。在这步工艺中,要注意用万用表测量各部分的连接情况。

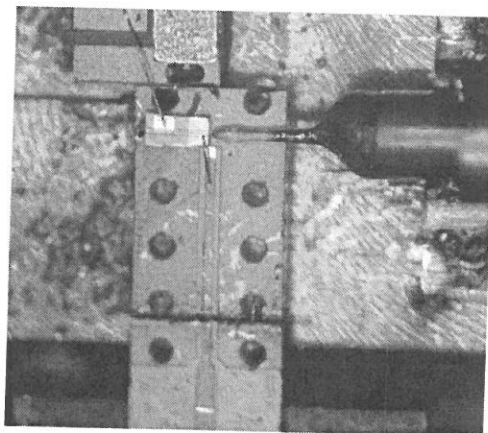
3、安装TEC与完成管芯级封装的TEC金属平台:将TEC焊接到管壳当中,然后在TEC上表面焊接管芯级封装的TEC金属支撑架。TEC下表面焊料的熔点为138°C,TEC上表面焊料的熔点为118°C,是所有焊料中最低的,因此先焊接TEC,再焊接TEC金属支撑架。在焊接时要注意使管芯级封装微带线与模块封装微带线的信号电极位置对正,以减小连接引线长度和微波损耗。

4、金线键合:采用West Bond公司生产的7476D楔型压焊机分别连接管芯封装微波传输线与模块封装微波传输线、氮化铝连接线的电极与管壳内相应的电极。因为TEC表面焊料的熔点温度仅有118°C,因此金线键合时的衬底加热温度为70°C,以免TEC表面焊料熔化造成已焊接组件的位移。

各部分安装完毕的实物照片如图3.17(a)所示。



(a) 光纤耦合前



(b) 光纤耦合后

图 3.17 模块封装实际效果图

5、光纤耦合焊接：在完成集成管芯的模块级封装后，进行光纤耦合焊接，这样就可以制作成光纤通信网络中可用的集成光源模块。由于目前实验室暂时还不具备集成光源模块光纤耦合的条件，因此，光纤耦合部分由中国科学院半导体所外协加工完成，完整的光纤耦合包括 Ω 型支架的安装和金属化光纤位置的固定，光纤位置需要精细调节以提高光纤耦合效率，并减小光纤端面光反射对集成管芯的影响。光纤耦合后的集成光源模块如图 3.17(b)所示。

3.3.2 集成光源模块性能测试

为确保模块的性能，完成模块封装第 4 步后依旧需要进行小信号响应测试，其测试结构如图 3.18 所示。测试完成后，选择性能优良的模块进行光纤耦合焊接。

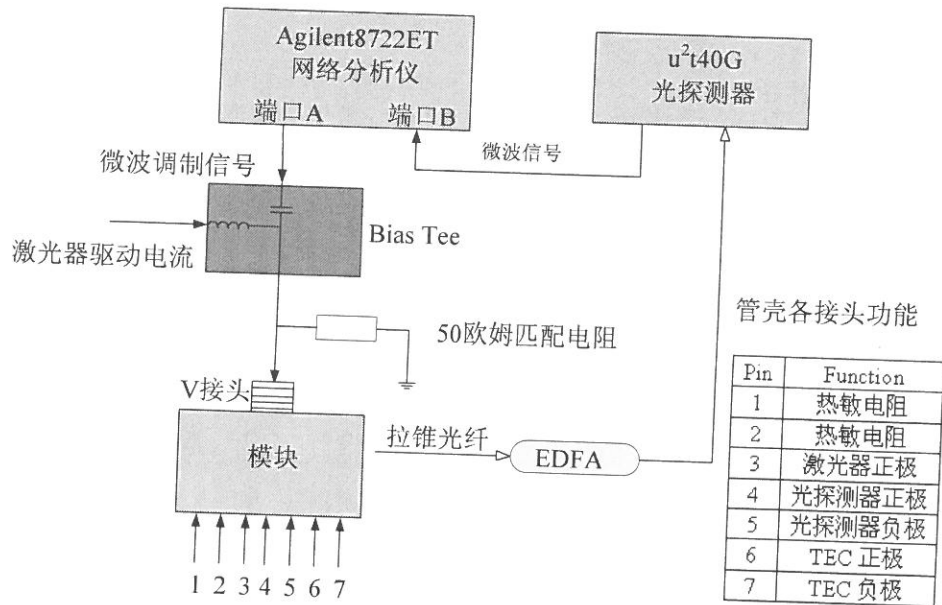


图 3.18 模块小信号调制特性测试系统配置图

模块的测试结果如图 3.19 所示。从图中可以看出，集成光源管芯的性能优异，3dB 带宽达到了 33GHz，并且从 0~40GHz 的带宽范围内，响应曲线下降的较为平稳，可以达到我们的应用要求。所以我们对其进行了光纤耦合焊接。

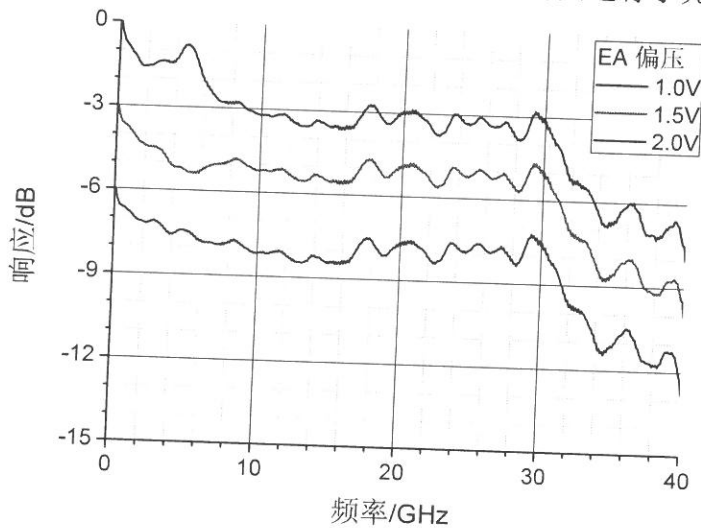


图 3.19 光源模块的小信号调制响应曲线（光纤耦合前）

在进行光纤耦合焊接后，就形成了完整的可以应用的集成光源模块。我们

对集成光源模块进行了小信号调制响应及大信号传输眼图的测试。小信号调制响应的测试系统如图 3.20 所示。

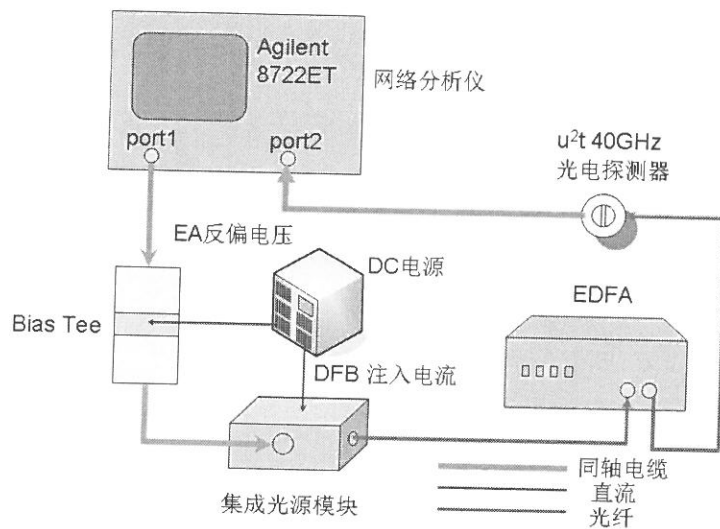


图 3.20 集成光源模块的小信号调制带宽测试系统

经过测试，得到了模块的小信号调制响应曲线如图 3.21 所示。与光纤耦合前相比，模块性能比较稳定，没有出现恶化现象。3dB 带宽依旧能够达到 32GHz 左右。

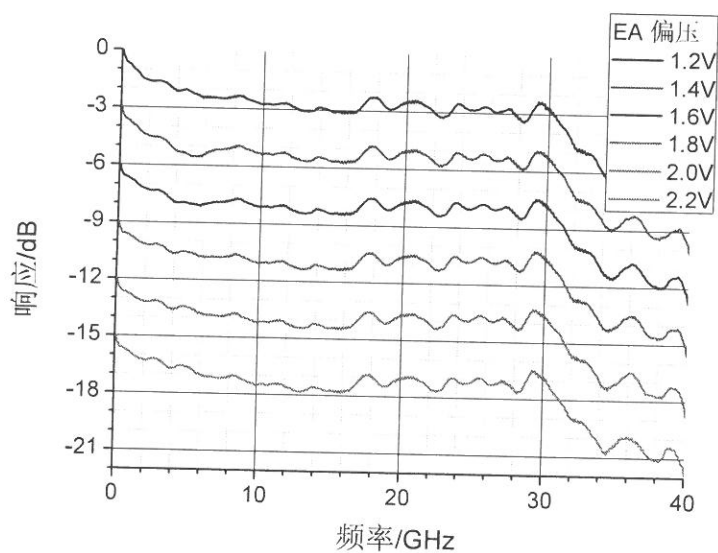


图 3.21 光源模块的小信号调制响应曲线（光纤耦合后）

将各步封装后测量的小信号调制响应进行综合的分析比较,如图 3.22 所示,通过对比观察,发现经过管芯级封装后,小信号调制响应一直比较稳定。这说明我们封装工艺具有很好的稳定性,可操作性。同时,管芯封装、模块封装后的效果明显比小管芯封装的效果优异,这说明了模块封装能够更好的实现集成光源管芯的功能且性能高效稳定。

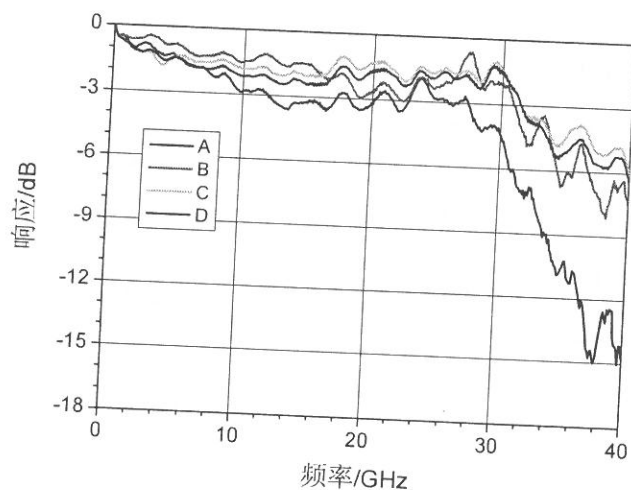


图 3.22 集成光源模块在模块封装中的调制响应曲线 (A: 管芯焊接到微波热沉上; B: 带管芯的微波热沉焊接到金属铜块上; C: 模块封装后光纤耦合前; D: 光纤耦合后)

我们对集成光源模块进一步进行了大信号传输眼图的测试,测试系统如图 3.23 所示。由 Anritsu 1775A 型脉冲信号发生器产生的 10 Gb/s 伪随机数字信号序列由 Anritsu 1803A 复用成 40 Gb/s 伪随机数字信号序列,其中 Anritsu 3695A 为时钟信号源,同时加载到 Agilent 86100C 数字通信分析仪上与输入脉冲序列进行同步。通过 Bias Tee 将 Anritsu 1803A 产生的速率为 43 Gb/s 的 NRZ 码与 EA 调制器直流反向偏压合为一路后,共同加载到集成光源模块的 V 接头射频输入端,集成光源模块中的 DFB 注入电流由 Agilent E3049A 直流电源提供,并通过 ILX lightwave LDC-3724B 型温度控制器使集成光源模块中 TEC 的温度保持在 15°C。由于调制偏压下从 EA 调制器端面输出光功率较小,不能直接采用 Agilent 86100C 数字通信分析仪测量调制眼图,因此需要在调制器后采用 EDFA 将调制光信号放大到数字通信分析仪的响应范围内 (0-2 dBm),才能进行大信号调制眼图的测试。经过 EDFA 放大的光信号送入数字通信分析仪后,由仪器内部的

光探测器转换为电信号后，即可在示波器上获得集成光源的调制眼图。

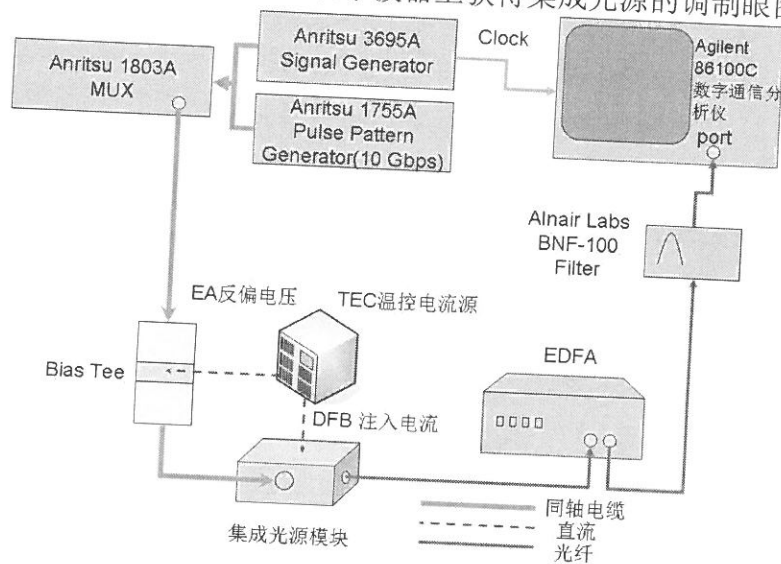
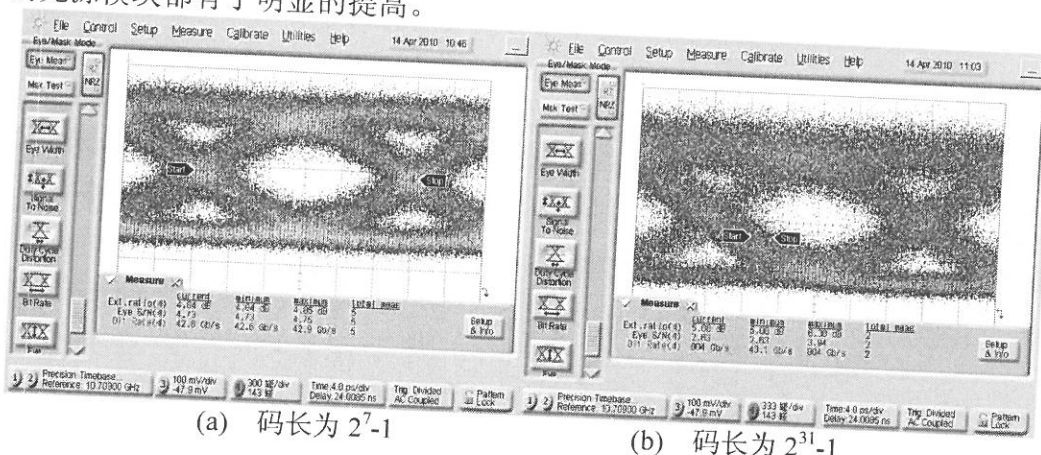


图 3.23 集成光源模块眼图测试系统结构图

图 3.24(a)和 6.24(b)为分别采用码长为 2^7-1 和 $2^{31}-1$ 的 NRZ 伪随机码在 43 Gb/s 调制速率下，测试得到的大信号调制眼图，测试中所采用的调制器反向偏压为 1.0 V，DFB 激光器注入电流为 55 mA，调制信号的峰峰值为 2.0 V。测试结果表明，码长的变化对调制眼图的性能没有明显影响。采用新型集成管芯模块封装方案，集成光源模块的大信号调制眼图质量有了明显的改善，新型集成光源模块在眼图张开度，上下眼皮厚度，动态消光比和信噪比上较实验室前期的光源模块都有了明显的提高。



(a) 码长为 2^7-1

(b) 码长为 $2^{31}-1$

图 3.24 集成光源模块 43 Gb/s 大信号调制眼图

由于在 55 mA 测试电流下的调制器出光功率较小, 需要经过 EDFA 放大到 2.0 dBm 后才能采用 Agilent 86100C 数字通信分析仪测量调制眼图。由于 EDFA 中放大自发辐射噪声 (Amplified Spontaneous Emission, ASE) 的影响, 导致眼图中上眼皮厚度增大和 0 电平位置的提高, 使调制器的动态消光比受到影响, 仅有 4.8 dB。为了减小测量链路中 ASE 噪声的影响, 我们采用了 Alnair Lab BNF-100 型窄带滤波器对在 EDFA 中的 ASE 噪声进行了滤除, 图 3.25 为加载调制信号后, 采用 EDFA 和窄带滤波器的输出光谱, 由于窄带滤波器的带宽约为 1 nm, 使进入信号通信分析仪的 ASE 噪声得到了明显的抑制。

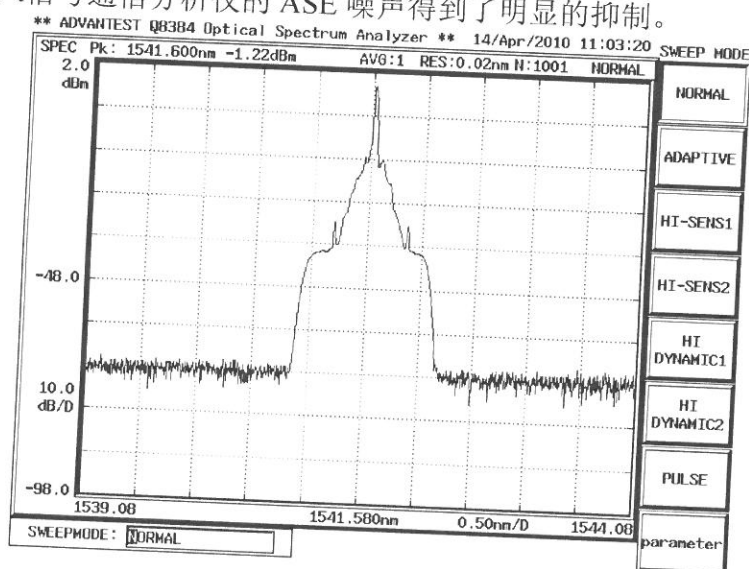


图 3.25 经过滤波器后的 EA 调制信号输出光谱

图 3.26 为采用滤波器后测量得到的调制眼图, 测量中所采用的 43 Gb/s NRZ 码峰峰值为 2.0 V, DFB 注入电流 55 mA。图 3.26(a)和 3.26(b)分别为调制器反向偏压在 1.3 V 和 1.2 V 时的调制眼图, 其动态消光比均大于 8 dB。测试结果表明, 在滤除了 EDFA 的 ASE 噪声后, 调制器动态消光比获得了明显提高。通过改变调制偏压, 得到的眼图动态消光比最大值为 9.4 dB, 但调制器反向偏压的增大将会导致眼图中脉冲上升沿和下降沿交叉点位置下降, 如图 3.26(a)所示。为此我们对调制偏压进行了优化, 得到的最佳调制偏压为 -1.2 V, 对应的调制眼图如图 3.26(b)所示, 其动态消光比为 8.2 dB, 信噪比达 5.62。

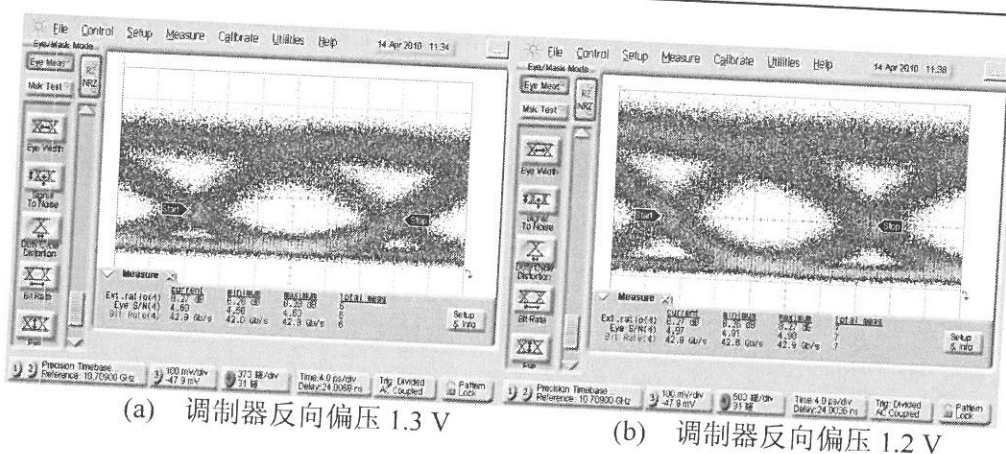


图 3.26 采用滤波器后不同调制偏压下的眼图

3.4 本章小结

本章系统的研究了集成光源模块的封装工艺，并且对封装中遇到的问题进行了仔细的分析，对集成光源进行了细致的测试。测试结果表明，集成光源模块在消光比、边模抑制比、温度稳定性、调制带宽等方面都有较好的性能。大信号调制眼图的测试结果表明，集成光源模块在 43 Gb/s 的调制速率下具有良好的眼图性能，动态消光比大于 8.2 dB，其特性指标已达到或接近商用产品的水平。

第4章 总结

4.1 研究总结

本论文针对集成光源模块封装中遇到的问题进行了细致的分析。为了提高DFB+EA集成光源模块的传输特性,从管芯EA端面沉积多层抗反射镀膜开始,到实际封装出可应用的光源模块,提高了集成光源模块封装的工艺稳定性及可重复性,取得良好的效果。

论文的主要研究成果包括以下几个方面:

- 1、对光源小信号调制响应中出现的张弛振荡的抑制方法进行了研究,改善了实验室前期采用单层抗反射镀膜存在的工艺不稳定等问题。通过多层抗反射镀膜的设计,最终实现了PECVD沉积 $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2$ 四层抗反射镀膜,在1550 nm波段附近的残余反射率达 10^{-4} 量级,取得了良好的抗反射效果;
- 2、在实验室已有集成光源管芯的基础上,进行了完整的发射模块封装。针对模块封装中遇到的微波接地、引线焊接等问题进行了分析并提出相应的解决方案,最终制作完成可应用的集成光源模块。模块的小信号调制带宽达到33 GHz,满足了40 Gb/s的应用需要。对模块的大信号眼图测试中,在43 Gb/s的调制速率下具有良好的眼图性能,动态消光比大于8.2 dB,其特性指标已达到或接近商用产品的水平。

4.2 对下一步工作的建议

- 1、针对管芯存在张弛振荡的问题,可以考虑改进管芯制作工艺,比如EA调制器采用弯曲波导结构,以进一步降低断面残余反射率,使得集成光源管芯具备一定的抑制张弛振荡的能力,这样有利于简化模块封装工艺;
- 2、在模块封装过程中,我们发现图3.9所示结构与图3.15所示结构的模块小信号调制响应有一定差别,这种区别对模块性能的影响暂时还不能得到明确的结论,需要进行深入的分析;
- 3、目前仅进行了集成光源模块的背靠背调制眼图的测试,需要进一步进行传输测试以及误码率特性的测量。

参考文献

- [1] Makino S, Shinoda K, et al. High Speed EA DFB Laser for 40G and 100Gb/s. *IEEE Transactions on Electronics*, 2009, E92c(7): 937-941.
- [2] J W Raring, L A Johansson, et al. Low drive voltage, negative chirp 40 Gb/s EA-modulator /widely-tunable laser transmitter, using quantum-well-intermixing. *Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference*, 2006, Vols 1-6, 2711-2713.
- [3] Fukano H, Yamanaka T, et al. Design and fabrication of low driving voltage electroabsorption modulators operating at 40 Gb/s. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(8): 1961-1969.
- [4] Kobayashi W, Arai M, et al. Design and Fabrication of 10/40Gb/s, Uncooled Electroabsorption Modulator Integrated DFB Laser With Butt-Joint Structure. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(1): 164-171.
- [5] 李同宁, 金锦炎, 罗毅等. 2.5 Gb/s 用 DFB-LD/EA 单片集成器件. *光通信研究*, 1999, 3, 42-47.
- [6] 刘宇, 祝宁华, 孙长征等. 10 Gb/s 电吸收调制器的微波封装设计. *中国激光*, 2005, 32(11), 1495-1498. 王健
- [7] 蔡鹏飞. 10Gb/s AlGaInAs DFB 激光器与 40Gb/s 集成光源模块研究: [博士学位论文]. 北京: 清华大学电子工程系, 2007.
- [8] Luo Y, Cai P F, et al. High-speed AlGaInAs-MQW integrated EA Modulator/DFB laser module based on identical epitaxial layer scheme for 40 gb/s optic fiber communication systems. 2007 International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, Conference Proceedings: 369-371
- [9] 田建柏, 熊兵, 罗毅等. 应用于 40Gb/s 电吸收调制器的 Al₂O₃ 高速热沉研究. *红外与毫米波学报*, 2006, 25(2), 105-108
- [10] 周奇伟. 40 Gb/s 高速集成光源模块封装关键技术研究: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学电子工程系, 2007.
- [11] Byeong Hoon Park, In Kim, Tae-I Kim, et al. Investigation of optical feedback in high-speed electroabsorption modulated lasers with a window region. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(4):777-779
- [12] Jongin Shim, Jongryeo Kim, Donghoon Jang, et al. Facet Reflectivity of a Spot Size Converter Integrated Semiconductor Optical Amplifier, *IEEE Journal Of Quantum Electronics*, 2002, 38(6):665-673

- [13] Hiroshi Hatakeyama, Koji Kudo, Tatsuya Sasaki, et al. Wavelength-selectable microarray light sources for wide-band DWDM applications. *IEEE Journal Of Seleted Topics In Quantum Electronics*, 2002, 8(6):1341-1348
- [14] Jinyan Jin, Decheng Tian, Jing Shi, et al. Fabrication and complete characterization of polarization insensitive 1310 nm InGaAsP-InP quantum-well semiconductor optical amplifiers. *Semiconductor Science And Technology*, 2004, 19:120-126
- [15] Shotaro Kitamura, Hiroshi Hatakeyama, Masayuki Yamaguchi, et al. Angled Facet S-Bend Semiconductor Optical Amplifiers for High-Gain and Large Extinction Ratio. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, 11(7):788-790
- [16] CHANG Jin, HUANG Dexiu, Experiment and research of coating on semiconductor optical amplifiers facets, study on optical communications, 2004, 5, 65-67 (in chinese)
- [17] Zhang Lijiang, Xiong Bing, Wang Jian, et al. Facet Antireflection Coatings Deposited by PECVD. *Semiconductor Optoelectronics(半导体光电)*, 2004, 25(5): 380-383 (in Chinese).
- [18] T. Mukai and Y. Yamamoto. Gain, frequency bandwidth, and saturation output power of AlGaAs DH laser amplifiers, *IEEE J. Quantum Electron.*, 1981, vol. QE-17: 1028-1034.
- [19] SUN Changzheng, XIONG Bing, WANG Jian et al. Fabrication and Packaging of 40-Gb/s AlGaInAs Multiple-Quantum-Well Electroabsorption Modulated Lasers Based on Identical Epitaxial Layer Scheme. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(11): 1464-1471.
- [20] TADASHI SAITOH, TAKA AKI MUKAI, AND OSAMU MIKAMI. Theoretical Analysis and Fabrication of Antireflection Coatings on Laser-Diode Facets. *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, 1985, LT-3: 288-293.
- [21] 纪爱玲、马利波、刘诚、王永谦. 纳米 Si-SiO_x 和 Si-SiN_x 复合薄膜的低温制备及其发光特性. *物理学报*, 2004, 53: 3818.
- [22] 王阳元、关旭东、马俊如. *集成电路工艺基础(第一版)* (北京: 高等教育出版社) 1991: P253.
- [23] David M. Braun and Roger L. Jungerman. Broadband multilayer antireflection coating for semiconductor laser facets. *OPTICS LETTERS*, 1995, vol.20:1154-1156.
- [24] 于威、刘丽辉、侯海虹等. 螺旋波等离子体增强化学气相沉积氮化硅薄膜. *物理学报*, 2003, 52: 687.
- [25] 王育梅, 吴孟强, 张树人. PECVD 法制备氮化硅薄膜的研究进展. *材料导报*, 2008, 22(1):36-39.
- [26] 李伟东, 吴学忠, 李圣怡, PECVD 氮化硅薄膜制备工艺研究. *中国机械工程*, 16(z1): 396-398.

- [27] 吴清鑫、陈光红、于映、罗仲梓. PECVD 法生长氮化硅工艺的研究. 功能材料, 2007, vol.5: 703.
- [28] Jungkeun Lee, Toshiki Tanaka, Shoji Sasaki, et al. Novel Design Procedure of Broad-Band Multilayer Antireflection Coatings for Optical and Optoelectronic Devicesg. JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY. 1998, 16: 884-891.
- [29] Kaminow I P, Eisenstein G, Stulz L W. Measurement of the modal reflectivity of an antireflection coating on a superluminescent diode. IEEE J Quantum Electron, 1983, 19 (4): 493-495
- [30] Datasheet for KYOCERA 40Gb/s VSR Products(R0123B), Tokyo: KYOCERA Co., 2007

致 谢

衷心感谢导师孙长征副教授对本人的精心指导。孙老师深厚的理论功底，严谨勤奋的工作态度，敏锐的科学思维使我深受启发，他的言传身教将使我终生受益。

感谢罗毅教授对我的关怀和指导，罗老师在为人治学方面的教导将使我在以后的道路上受益良多。

感谢熊兵老师在科研工作中的细心指导，感谢实验室全体老师和同学的热情帮助和支持。

最后，感谢一直关心帮助我的亲人和朋友们。

声 明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签 名：_____日 期：_____

个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果

个人简历

1986年2月6日出生于吉林省德惠市。

2003年9月考入清华大学电子工程系电子科学与技术专业,2007年7月本科毕业并获得工学学士学位。

2007年9月免试进入清华大学电子工程系攻读工学硕士至今。

发表的学术论文

- [1] 袁贺 孙长征 徐建明 武庆 熊兵 罗毅, 基于 PECVD 技术的光电子器件用多层抗反膜的设计和制作, 物理学报 2010, 已接收.(SCI)
- [2] Zhizhi Liu, He Yuan, Changzheng Sun, et al. Grounded Coplanar Waveguide with Via Holes for High-speed Integrated EA Modulator/DFB Laser Module . INOW 2007 (EI)