

半导体科学与技术丛书

光电子器件微波 封装和测试

(第二版)

祝宁华 著



科学出版社

www.sciencep.com

半导体科学与技术丛书

光电子器件微波 封装和测试

(第二版)

祝宁华 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书总结了作者多年来的工作经验和近期研究成果,系统地介绍了高速光电子器件测试和微波封装设计方面的实用技术,先进性、学术性和实用性兼备。全书共12章,内容包括半导体激光器、光调制器和光探测器三种典型高速光电子器件的微波封装设计,网络分析仪扫频测试法、小信号功率测试法、光外差技术等小信号频率响应特性测试方法及测试系统校准方法,数字和模拟通信光电子器件大信号频率响应特性测试方法,光电子器件本征响应特性分析和应用,光谱与频谱分析技术,光注入技术及其应用。

本书适合从事光电子器件教学与研究的科研工作者、工程技术人员、研究生和高年级本科生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

光电子器件微波封装和测试/祝宁华著. —2版. —北京:科学出版社, 2011

(半导体科学与技术丛书)

ISBN 978-7-03-033004-8

I. ①光… II. ①祝… III. ①光电器件-微波技术-封装工艺 ②光电器件-微波测量 IV. ①TN15

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第256985号

责任编辑:钱俊/责任校对:赵桂芬

责任印制:钱玉芬/封面设计:陈敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年7月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2011年12月第 二 版 印张: 28 1/2

2011年12月第二次印刷 字数: 542 000

定价: 96.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《半导体科学与技术丛书》编委会

名誉顾问: 王守武 汤定元 王守觉

顾问: (按姓氏拼音排序)

陈良惠 陈星弼 雷啸霖 李志坚 梁骏吾 沈学础
王 圩 王启明 王阳元 王占国 吴德馨 郑厚植
郑有焯

主 编: 夏建白

副主编: 陈弘达 褚君浩 罗 毅 张 兴

编 委: (按姓氏拼音排序)

陈弘毅 陈诺夫 陈治明 杜国同 方祖捷 封松林
黄庆安 黄永箴 江风益 李国华 李晋闽 李树深
刘忠立 鲁华祥 马骁宇 钱 鹤 任晓敏 邵志标
申德振 沈光地 石 寅 王国宏 王建农 吴晓光
杨 辉 杨富华 余金中 俞育德 曾一平 张 荣
张国义 赵元富 祝宁华

第二版前言

本书初版于 2007 年 7 月问世, 读者对书中的内容非常关注, 华为技术有限公司的同行们正是通过该书, 对作者及作者单位有了全面的了解, 从而签订了新的合作协议. 不到两年的时间出版社书库已告售罄. 考虑到高速光电子技术正处于飞速发展时期, 各种新技术和新工艺不断涌现, 有必要通过书稿再版补充相关内容. 同时, 在与读者的交流中我们发现, 有许多新的技术内容应该描述得更加完善. 因此, 我们决定再版而不是重新印刷.

在这一版中对大部分章节进行了扩充, 并增加了第 12 章. 由于以前参加本书撰写工作的大部分人员已经离开或毕业, 所以我们对参加修订的人员分工进行了较大调整. 参加人员和补充修改的章节如下:

2.3 节和 2.6 节由满江伟编写; 4.5 节、10.3 节由陈硕夫编写; 6.5 节和 6.6 节由张昀编写; 7.3 节、8.4 节、11.2 节和 11.4 节由王礼贤编写; 8.8 节和 8.9 节由客建红编写; 9.6 节由孙可编写; 增加的第 12 章由李伟编写.

祝宁华

2011 年 3 月 25 日于北京

第一版序

高速光电子器件芯片及其模块的高频结构设计和高频特性的测试分析是微波光电子学领域的重要研究课题,也是该芯片及其模块实用化必然涉及的重要技术。目前,高频特性已经成为光电子器件研究的重要内容,微波封装和测试技术已经成为光电子和微电子器件的支撑技术。随着光通信速率的提高,封装和测试技术必将越来越受到科技工作者和工程技术人员的高度重视。

微波光电子学是一个涉及多学科的研究课题。由于微波光电子器件自身的特殊性,许多由微波技术、光电子技术或微电子技术借鉴而来的研究方法和分析思路并不完全适用,大量的基础问题有待进一步解决。祝宁华博士结合多年的工作经验,将已发表的论文系统整理成《光电子器件微波封装和测试》一书,“雪中送炭”地迎合了光电子技术发展的迫切需求。书中给出了一些新的定义和概念,提出了一些简便而又有效的方法,在探索新的分析思路方面作出了很好的尝试,形成了一套完整的研究方法。

作者在书中提出的“在高速光电子器件研制过程中,从芯片设计阶段就必须考虑器件的整体设计,并把器件封装设计视为器件设计的重要部分”和“测试分析不再局限于器件性能检测,而是器件优化设计、建模和系统集成中有力的、不可替代的分析手段”的观点是完全正确的。

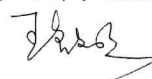
书中深刻体现了作者注重实验研究的风格。作者通过大量实验结果详细描述了器件的响应特性及变化规律,以及实验系统的工作原理和调试步骤,并介绍了研究方法的应用条件和使用技巧,使读者有直观的感性认识。各个章节互为呼应、紧密联系,读者可以从中系统深入地了解芯片测试分析、器件微波封装、高频性能测试、等效电路和寄生参数的影响分析以及器件封装优化设计等方面的丰富内容。

作者注重实际应用,所介绍的实验方法和理论分析模型都是针对器件特性分析、微波封装和综合性能优化设计,但又不失其方法的普适性。同时,该书还提出了一些目前尚未解决的疑难问题,对未来发展趋势的展望,给读者留下一些思考的空间,希望与读者一同对这些问题进行探讨和研究,进一步发展高速光电子器件封装、测试和系统应用技术。

就本人所知,目前国内外尚未见有从理论到实验方法上系统和深入地介绍此相关内容的科学技术专著。对于光电子学领域研究和教学人员,无疑这是一本有重要

实用价值的参考书. 为此, 我乐意为此书作序, 并深切地期望该书的出版能为光电子学领域理论研究和和技术应用的发展, 为高速光电子学的开拓和发展起到积极的推动作用.

中国科学院院士



2007年3月18日

第一版前言

在学术交流和讲座之后,听众经常会向作者索要电子讲稿.另外许多读者在读过作者发表的论文后,常常来信索取更加详细的文献资料.在提供这些材料之前,作者通常需要加上许多注释来帮助读者理解相关内容.另外在帮助其他研究机构测试和封装器件时,用户通常会提出许多类似的问题,要解释清楚这些问题,必须从最基本概念开始,这需要花很多时间.在研究工作中,作者发现要找到某些概念或方法的全面的描述并非易事,这使作者产生了写这本书的想法.最初希望本书能有一定的系统性,能比较全面地介绍光电子器件测试和封装方面的内容.但是,作者很快发现,要写的内容太多,而且对许多问题的探讨不够深入,这不太现实,也不符合写这本书的初衷.

之后,作者将书的提纲作了较大调整,主要立足于总结二十年来的工作经验和新发展起来的方法,比较深入地介绍高速光电子器件测试和微波封装设计方法.然而,作者又发现有许多计划纳入本书的研究内容还没有完全成熟.作者在相关研究课题上进行了新的部署,希望通过近几届学生的努力,使本书的内容更加充实、完整,这样导致书稿迟迟不能完成.恰在此时,科学出版社组织《半导体科学与技术丛书》,在丛书主编夏建白院士的鼓励下,作者下决心借此机会在近期完成这本书,而将现在不能解决的问题留下来,让读者和作者在今后的工作中一起去探索,这就出现了读者眼前的这本书.

在完成书稿之际,作者想起了许多老师、同事和学生.毫无疑问,书中的每一章节、每一个图表、每一个观点都是得益于老师的教授、同事的配合、学生的辅助.同时,在兰州大学、电子科技大学、中山大学、华南理工大学、香港城市大学和慕尼黑技术大学的学术讲座和交流中,与学生的讨论过程中,增加了对大家所关注的技术的了解,作者从中受益匪浅.

感谢导师林为干院士和吴正德教授,还有刘盛纲院士、张其劭教授、关本康教授、杨淑雯教授、刘仁厚教授等,是他们将作者带到了微波技术和光电子器件研究领域.

感谢王启明、王圩、陈良惠、夏建白、王占国五位院士,没有他们的鼓励和支持,作者很难在繁重的工作中抽时间完成本书.

感谢前任所长郑厚植院士在作者刚回国购买第一台测试仪器筹款时给予的帮助和2002年进一步建设高速光电子器件测试平台时给予的大力支持.没有这些测试仪表,不可能完成本书所谈及的实验工作.

感谢长期以来在研究工作中默契合作的同事们,他们是中国科学院半导体研究所的赵玲娟、朱洪亮、黄永箴、杨辉、陈弘达、马骁宇、谭满清七位研究员,以及深圳大学杨淑雯和王仁明两位教授,中山大学林貽堃教授、郑兴世教授,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所金锋研究员。

为了节省读者的时间,有直观的认识,本书尽可能采用实验数据绘制图表,因此工作量非常大。感谢已经毕业的博士研究生们,在他们撰写论文期间,完成大量的实验和理论工作,与他们共同发表的论文为本书提供了大量的数据资料,他们是曾雄文、王幼林、陈振宇、孙建伟、张胜利、宋海鹏、刘超、张尚剑、伞海生、张欣十位博士以及钱辰、冯巍巍和陈诚等学生。

在这里要特别感谢谢亮博士,以及刘宇、王欣、袁海庆、张家宝、李亮、陈伟、俞芷莱等几位同志,他们完成了实验工作所需要的所有器件样品。感谢我的助手和研究生,他们参加了实验工作和资料整理工作。其中,第2章由刘宇、徐桂芝、刘骥、王欣编写;第3章由王欣、刘宇、哈森其其格编写;第4章由刘宇、黄亨沛、张韬编写;第5章由哈森其其格编写;第7章由黄亨沛编写;第8章由温继敏编写;第9章由刘骥、谢亮编写;第10章由黄亨沛、温继敏、哈森其其格编写;第11章由温继敏、张韬、王欣编写。

感谢国家自然科学基金,科技部863计划、973计划、国际合作计划,国家留学基金多年来对研究工作的支持。还要感谢德国洪堡基金会提供部分经费,使得作者能够在刚回国时购买一台微波网络分析仪,利用该仪器做了大量测试工作。

还要感谢西门子公司公司的 Auracher 博士、香港城市大学的钟宝璇教授和潘裕斌教授、德国慕尼黑技术大学的 Amann 教授和 Hofmann 先生、芬兰赫尔辛基技术大学的 Silvonon 教授等在十几年来合作研究中的支持和帮助,在工作上提供的难得的机会。同时感谢他们在作者及家人在国外工作和生活期间给予的关照,使得作者能够涉足先进的技术领域,掌握前沿科学技术,潜心思考一些问题。

作者深深感到每一个研究课题,甚至每一项实验工作,从最初的想法到方案的实现,都需要整个课题组的共同努力,需要单位内部各部门间的相互配合,其他行业领域的支持。作者还要特别感谢广东惠州甘炳坤先生,他是一位学生的家长,在作者刚回国时,他提供了十万元人民币,用于支持作者的研究工作。还有许多关心和支持本书工作的其他部门和人士,作者不能一一提及,也于此一并致谢!

大部分书稿是利用周末或晚上时间在家中完成的。感谢家人的理解,借此机会向她们表示衷心的感谢!

本书适合于从事光电子器件研究的科技工作者和工程技术人员,特别是研究生。由于在其他参考书中很难找到与本书相同的内容,对阅读中有困难的部分章节,读者可以大概了解或跳过去。书中给出了一些总结性分析讨论,例如,第10.2.4节比较了本征响应特性分析的三种方法,第11.6节总结了获得第一个光电子器件测

试标准方法. 这部分内容将有助于读者理解有关内容. 由于书中许多内容仍然处在探索之中, 叙述不当和遗漏在所难免, 希望读者将意见反馈回来, 以便在本书再版时补充和修改. 为方便联系, 特留下 Email: nhzhu@semi.ac.cn.

祝宁华

2006 年 12 月 16 日于北京

《半导体科学与技术丛书》出版说明

半导体科学与技术在 20 世纪科学技术的突破性发展中起着关键的作用，它带动了新材料、新器件、新技术和新的交叉学科的发展创新，并在许多技术领域引起了革命性变革和进步，从而产生了现代的计算机产业、通信产业和 IT 技术。而目前发展迅速的半导体微/纳电子器件、光电子器件和量子信息又将推动 21 世纪的技术发展和产业革命。半导体科学技术已成为与国家经济发展、社会进步以及国防安全密切相关的重要的科学技术。

新中国成立以后，在国际上对中国禁运封锁的条件下，我国的科技工作者在老一辈科学家的带领下，自力更生，艰苦奋斗，从无到有，在我国半导体的发展历史上取得了许多“第一个”的成果，为我国半导体科学技术事业的发展，为国防建设和国民经济的发展做出过有重要历史影响的贡献。目前，在改革开放的大好形势下，我国新一代的半导体科技工作者继承老一辈科学家的优良传统，正在为发展我国的半导体事业、加快提高我国科技自主创新能力、推动我们国家在微电子和光电子产业中自主知识产权的发展而顽强拼搏。出版这套《半导体科学与技术丛书》的目的是总结我们自己的工作成果，发展我国的半导体事业，使我国成为世界上半导体科学技术的强国。

出版《半导体科学与技术丛书》是想请从事探索性和应用性研究的半导体工作者总结和介绍国际和中国科学家在半导体前沿领域，包括半导体物理、材料、器件、电路等方面的进展和所开展的工作，总结自己的研究经验，吸引更多的年轻人投入和献身到半导体研究的事业中来，为他们提供一套有用的参考书或教材，使他们尽快地进入这一领域中进行创新性的学习和研究，为发展我国的半导体事业作出自己的贡献。

《半导体科学与技术丛书》将致力于反映半导体学科各个领域的基本内容和最新进展，力求覆盖较广阔的前沿领域，展望该专题的发展前景。丛书中的每一册将尽可能讲清一个专题，而不求面面俱到。在写作风格上，希望作者们能做到以大学高年级学生的水平为出发点，深入浅出，图文并茂，文献丰富，突出物理内容，避免冗长公式推导。我们欢迎广大从事半导体科学技术研究的工作者加入到丛书的编写中来。

愿这套丛书的出版既能作为国内半导体领域的学者提供一个机会，将他们的累累硕果奉献给广大读者，又能对半导体科学和技术的教学和研究起到促进和推动作用。

夏建白

2005 年 3 月 16 日

目 录

第二版前言

第一版序

第一版前言

第 1 章 绪论	1
1.1 器件封装设计的重要性	1
1.2 器件测试分析的意义	2
1.3 本书主要涉及的器件类型	2
1.4 本书的特点	3
第 2 章 高速半导体激光器的微波封装设计	6
2.1 激光器封装类型	6
2.1.1 TO 封装激光器	6
2.1.2 蝶型封装激光器	8
2.1.3 气密小室封装和子载体封装激光器	10
2.2 微波设计和封装方法	11
2.2.1 载体设计	11
2.2.2 金丝设计	12
2.2.3 传输线过渡结构设计	12
2.2.4 匹配电路设计	12
2.2.5 偏置电路设计	13
2.2.6 综合设计考虑	13
2.2.7 焊接和耦合封装	14
2.3 激光器等效电路模型	15
2.3.1 等效电路模型发展历程	15
2.3.2 边发射激光器小信号等效电路模型	17
2.3.3 面发射激光器小信号等效电路模型	21
2.3.4 激光器大信号模型	28
2.3.5 基于速率方程的电路模型	33
2.4 集总参数和分布式模型	37
2.5 “黑盒子”式等效电路模型	39
2.6 封装技术潜在带宽估计	40

2.6.1	封装技术潜在带宽估计的意义	40
2.6.2	激光器芯片和模块的测试	41
2.6.3	激光器芯片及模块本征响应对热效应的依赖关系	43
2.6.4	激光模块寄生参数的表征	47
2.6.5	直接扣除法	51
2.6.6	等效电路法	53
2.7	激光器封装的优化设计	54
2.7.1	寄生参数对高频特性的影响	54
2.7.2	载体上激光器等效电路	55
2.7.3	TO 封装激光器模块等效电路	56
2.7.4	封装寄生参数的影响	58
2.8	补偿技术	60
	思考题	62
	参考文献	62
第 3 章	高速光调制器的微波封装设计	70
3.1	LiNbO ₃ 光波导调制器	70
3.1.1	光波导制备与模场分布	70
3.1.2	光波导调制器的结构和工作原理	71
3.1.3	实现宽带调制的条件	72
3.1.4	电极特性参数的计算	73
3.1.5	光波导传输特性的计算	74
3.1.6	电极结构优化设计	74
3.1.7	管壳设计及终端阻抗匹配	77
3.2	电吸收光调制器	78
3.2.1	封装类型	78
3.2.2	微波设计和封装方法	81
3.3	电吸收光调制器的等效电路模型	81
3.4	EML 三端口等效电路模型的建立与分析	83
3.4.1	影响 EML 高频特性的因素	83
3.4.2	电光耦合效应	84
3.4.3	三端口模型分析	85
3.4.4	三端口等效电路模型	87
3.4.5	电光耦合效应对器件高频特性的影响	91
3.5	封装的优化设计	93
	思考题	96

参考文献	97
第 4 章 高速半导体光探测器的封装设计	104
4.1 封装类型	104
4.2 微波设计和封装方法	105
4.3 光探测器的等效电路模型	106
4.3.1 速率方程等效电路建模	107
4.3.2 微波端口特性等效电路建模	111
4.4 封装潜在带宽研究	112
4.4.1 散射参数测量	112
4.4.2 潜在带宽估计	115
4.5 多种功能微结构光探测器	117
4.5.1 面发射激光器作探测器	117
4.5.2 电吸收调制器的多重功能	118
4.5.3 DBR 调谐结构的光探测器	120
4.6 封装的优化设计	123
4.6.1 元部件共同作用	123
4.6.2 补偿技术	124
思考题	126
参考文献	126
第 5 章 小信号频率响应特性	130
5.1 小信号与大信号频率响应	130
5.2 常用的网络参数	133
5.3 散射参数	134
5.4 双端口级联网络的参数	135
5.5 光电子器件 S 参数	137
5.6 主要性能指标定义	139
5.7 动态特性曲线	140
5.7.1 激光器动态 $P-I$ 特性曲线	140
5.7.2 调制器动态 $P-V$ 特性曲线	142
5.7.3 激光光源大信号啁啾特性估计	143
思考题	145
参考文献	145
第 6 章 网络分析仪扫频测试方法	147
6.1 测试方法优点与局限性	147
6.2 校准的概念和测试夹具的设计	149

6.3	校准过程中出现的问题	150
6.3.1	相位不确定性	150
6.3.2	频率限制问题	152
6.3.3	不同测试端口夹具的校准	155
6.4	校准标准的选取	158
6.4.1	校准方法的选取	158
6.4.2	校准标准的比较	159
6.5	运算方法的选择	160
6.5.1	校准方程的选取	160
6.5.2	运算方法的改进	164
6.6	微波电路测试方法	165
6.6.1	16项误差模型	165
6.6.2	四端口电路误差模型的建立和校准标准的选择	166
6.6.3	最小二乘近似互易在校准中的应用	168
6.7	芯片测试方法	169
6.8	时域特性分析和相频特性测试	174
6.9	未解决的疑难问题	176
6.9.1	如何获得第一个电光或光电器件传输标准	176
6.9.2	两个正确的公式给出不同的结果	176
6.9.3	TSM方法中不同标准方程组合给出不同的结果	177
6.10	“鸡”和“蛋”问题的总结	179
	参考文献	181
第7章	调制器频率响应的小信号功率测试法	187
7.1	LiNbO ₃ 调制器小信号功率测试法	187
7.1.1	测试原理和测量系统	188
7.1.2	影响测试精度的因素	190
7.1.3	微波检波器及其他元件的校准	192
7.1.4	利用微波网络分析仪的扫频测试	196
7.2	电吸收调制器小信号功率测试法	198
7.2.1	EAM 频率响应理论分析	198
7.2.2	EAM 小信号功率测试原理	200
7.2.3	测试系统与实例	201
7.3	高速光探测器谐波测试法	202
7.3.1	铌酸锂调制器中谐波的产生	202
7.3.2	谐波测试法及校准	203

思考题	206
参考文献	206
第 8 章 光外差技术及其应用	209
8.1 光外差原理及测试系统	209
8.2 激光器波长调谐方式	210
8.3 双激光器拍频法测量高速探测器的频率响应	212
8.4 采用单个 DBR 可调谐激光器的光外差法	215
8.4.1 可调谐激光器的调谐特性	215
8.4.2 测试原理和校准方法	218
8.5 高速光调制器的频率响应测量	224
8.5.1 光强度调制器的频率响应测量	224
8.5.2 光相位调制器的频率响应测量	225
8.6 自发辐射谱拍频法测量高速探测器的频率响应	226
8.6.1 自发辐射谱拍频法的测试原理	226
8.6.2 自发辐射谱拍频法的测试系统	227
8.7 光外差技术分析激光器的附加调制效应	230
8.8 波长编码光时域反射计	235
8.8.1 测量光纤断点	235
8.8.2 测量布里渊分布	238
8.9 光外差法测量 DBR 激光器的调谐特性	241
8.9.1 DBR 激光器调谐速度测量	241
8.9.2 DBR 激光器的波长漂移	245
8.10 光外差光谱分析技术及激光器的线宽测量	252
思考题	253
参考文献	254
第 9 章 大信号响应特性测试方法	258
9.1 数字通信用器件的大信号测量	259
9.1.1 大信号特性测试系统	259
9.1.2 眼图的形成	260
9.1.3 眼图的测试分析	262
9.1.4 归零码眼图简介	267
9.1.5 误码率的测试分析	268
9.1.6 低误码率的测算	269
9.2 大信号测试系统校准方法初探	271
9.2.1 “面对面”方法	271

9.2.2	借助于小信号散射参数测量的校准方法	272
9.3	模拟通信用器件的大信号测量	274
9.3.1	模拟激光器的特点	274
9.3.2	光发射器件的调制原理	275
9.3.3	模拟通信用器件的参数及测试方法	276
9.4	大信号特性与小信号相频特性	280
9.5	大信号传输系统压力测试	284
9.5.1	光功率压力测试与灵敏度	284
9.5.2	光信噪比压力测试与误码率	285
9.5.3	色散压力测试	287
9.6	大信号响应测试的发展趋势	289
	思考题	290
	参考文献	290
第 10 章	光电子器件本征特性分析及其应用	293
10.1	本征响应特性分析的意义	293
10.2	激光器本征特性分析	294
10.2.1	光调制法	294
10.2.2	等效电路法	296
10.2.3	扣除法	300
10.2.4	三种方法的比较	304
10.2.5	不同温度下本征响应特性	305
10.3	光探测器本征特性分析	307
10.3.1	光探测器扣除法的原理	308
10.3.2	实验结果及分析	310
10.3.3	偏压和温度对本征响应的影响	311
10.4	光调制器本征特性分析	315
10.4.1	扣除法获得电吸收调制器本征响应的原理	315
10.4.2	实验结果及分析	318
10.5	本征响应特性分析的应用	319
	思考题	319
	参考文献	320
第 11 章	光谱与频谱分析技术	323
11.1	光谱与频谱特性分析的意义	323
11.2	借助电域测量获得光电子器件的特性	324
11.2.1	光外差技术的发展历程	324