

半导体科学与技术丛书

光电子器件微波封装和测试

Microwave Design and Characterization of
Optoelectronics Devices and Packaging

祝宁华 著



科学出版社

www.sciencep.com

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。全书共十一章,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的总结。

本书适合从事光电子器件教学与研究的科技工作者、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= Microwave Design and Characterization of Optoelectronics Devices and Packaging/祝宁华著. —北京:科学出版社, 2007

(半导体科学与技术丛书)

ISBN 978-7-03-019198-4

I. 光… II. 祝… III. ①光电器件-封装工艺②光电器件-测试技术
IV. TN206

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 091698 号

责任编辑:牛宇锋 田士勇/责任校对:张 琪

责任印制:刘士平/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>

双青印刷厂印刷

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)

2007年7月第一次印刷 印张: 19 1/2

印数: 1—3 000 字数: 368 000

定价: 48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

“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
- 执行编辑** 田士勇

“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”的目的是为了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、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做出自己的贡献。

“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

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。文中给出了一些新的定义和概念，提出了一些简捷而又有效的方法，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。

作者在文中提出的“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。

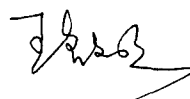
文中深刻体现了作者注重实验研究的风格。作者通过大量实验结果详细描述了器件的响应特性及变化规律，以及实验系统的工作原理和调试步骤，并介绍了研究方法的应用条件和使用技巧，使读者有直观的感性认识。各个章节互为呼应、紧密联系，读者可以从中系统深入地了解芯片测试分析、器件微波封装、高频性能测试、等效电路和寄生参数的影响分析以及器件封装优化设计等方面的丰富内容。

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 王启明

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Wang Qiming', with a long horizontal stroke extending to the right.

2007年3月18日

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，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，中山大学林贻堃教授、郑兴世教授，中国科学院长春光机所金锋研究员。

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，在他们的论文工作期间，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，第二章由刘宇、徐桂芝、刘戡、王欣编写；第三章由王欣、刘宇、哈森其其格编写；第四章由刘宇、黄亨沛、张韬编写；第五章由哈森其其格编写；第七章由黄亨沛编写；第八章由温继敏编写；第九章由刘戡、谢亮编写；第十章由黄亨沛、温继敏、哈森其其格编写；第十一章由温继敏、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 教授等在十几年来的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 小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

目 录

“半导体科学与技术丛书”出版说明

序

前言

第一章 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
第二章 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	13
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
2.4 集总参数和分布式模型.....	34
2.5 “黑盒子”式等效电路模型.....	36
2.6 封装技术潜在带宽估计.....	37

2.6.1	封装技术潜在带宽估计的意义	37
2.6.2	激光器芯片和模块的测试	38
2.6.3	直接扣除法	40
2.6.4	等效电路法	42
2.7	激光器封装的优化设计	44
2.7.1	寄生参数对高频特性的影响	44
2.7.2	载体上激光器等效电路	44
2.7.3	TO封装激光器模块等效电路	45
2.7.4	封装寄生参数的影响	47
2.8	补偿技术	49
	思考题	51
	参考文献	51
第三章	高速光调制器的微波封装设计	56
3.1	铌酸锂光波导调制器	56
3.1.1	光波导制备与模场分布	56
3.1.2	光波导调制器的结构和工作原理	57
3.1.3	实现宽带调制的条件	58
3.1.4	电极特性参数的计算	60
3.1.5	光波导传输特性的计算	60
3.1.6	电极结构优化设计	61
3.1.7	管壳设计及终端阻抗匹配	63
3.2	电吸收光调制器	64
3.2.1	封装类型	64
3.2.2	微波设计和封装方法	68
3.3	电吸收光调制器的等效电路模型	69
3.4	EML三端口等效电路模型的建立与分析	70
3.4.1	影响 EML 高频特性的因素	70
3.4.2	电光耦合效应	71
3.4.3	三端口模型分析	72
3.4.4	三端口等效电路模型	74
3.4.5	电光耦合效应对器件高频特性的影响	78
3.5	封装的优化设计	81
	思考题	84
	参考文献	85

第四章 高速半导体光探测器的封装设计	90
4.1 封装类型	90
4.2 微波设计和封装方法	91
4.3 光探测器的等效电路模型	93
4.3.1 速率方程等效电路建模	93
4.3.2 微波端口特性等效电路建模	97
4.4 封装潜在带宽研究	98
4.4.1 散射参数测量	98
4.4.2 潜在带宽估计	101
4.5 封装的优化设计	102
4.5.1 元部件共同作用	102
4.5.2 补偿技术	103
思考题	105
参考文献	105
第五章 小信号频率响应特性	108
5.1 小信号与大信号频率响应	108
5.2 常用的网络参数	111
5.3 散射参数	113
5.4 双端口级联网络的参数	114
5.5 光电子器件 S 参数	116
5.6 主要性能指标定义	117
5.7 动态特性曲线	119
5.7.1 激光器动态 P-I 特性曲线	119
5.7.2 调制器动态 P-V 特性曲线	120
5.7.3 激光光源大信号啁啾特性估计	121
思考题	123
参考文献	124
第六章 网络分析仪扫频测试方法	125
6.1 测试方法优点与局限性	125
6.2 校准的概念和测试夹具的设计	127
6.3 校准过程中出现的问题	128
6.3.1 相位不确定性	128
6.3.2 频率限制问题	130
6.3.3 不同测试端口夹具的校准	133

6.4	校准标准的选取	136
6.4.1	校准方法的选取	136
6.4.2	校准标准的比较	137
6.5	运算方法的选择	137
6.5.1	校准方程的选取	137
6.5.2	运算方法的改进	138
6.6	芯片测试方法	139
6.7	时域特性分析和相频特性测试	145
6.8	未解决的疑难问题	147
6.8.1	如何获得第一个电-光或光-电器件传输标准	147
6.8.2	两个正确的公式给出不同的结果	147
6.8.3	TSM 方法中不同标准方程组合给出不同的结果	149
	参考文献	149
第七章	调制器频率响应的小信号功率测试法	152
7.1	铌酸锂调制器小信号功率测试法	152
7.1.1	测试原理和测量系统	153
7.1.2	影响测试精度的因素	155
7.1.3	微波检波器及其他元件的校准	157
7.1.4	利用微波网络分析仪的扫频测试	161
7.2	电吸收调制器小信号功率测试法	163
7.2.1	EAM 频率响应理论分析	163
7.2.2	EAM 小信号功率测试原理	165
7.2.3	测试系统与实例	166
	思考题	167
	参考文献	167
第八章	光外差技术及其应用	169
8.1	光外差原理及测试系统	169
8.2	激光器波长调谐方式	170
8.3	双激光器拍频法测量高速探测器的频率响应	172
8.4	采用单个 DBR 可调谐激光器的光外差法	176
8.4.1	可调谐激光器的调谐特性	176
8.4.2	测试原理和校准方法	179
8.5	高速光调制器的频率响应测量	182
8.5.1	光强度调制器的频率响应测量	183

8.5.2 光相位调制器的频率响应测量	184
8.6 自发辐射谱拍频法测量高速探测器的频率响应	184
8.6.1 自发辐射谱拍频法的测试原理	185
8.6.2 自发辐射谱拍频法的测试系统	186
8.7 光外差光谱分析技术以及激光器的线宽测量	189
思考题	189
参考文献	190
第九章 大信号响应特性测试方法	192
9.1 数字通信用器件的大信号测量	192
9.1.1 大信号特性测试系统	192
9.1.2 眼图的形成	193
9.1.3 眼图的测试分析	195
9.1.4 归零码眼图简介	200
9.1.5 误码率的测试分析	201
9.1.6 低误码率的测算	202
9.2 大信号测试系统校准方法初探	203
9.2.1 “面对面”方法	204
9.2.2 借助于小信号散射参数测量的校准方法	205
9.3 模拟通信用器件的大信号测量	206
9.3.1 模拟激光器的特点	206
9.3.2 光发射器件的调制原理	208
9.3.3 模拟通信用器件的参数及测试方法	209
9.4 大信号特性与小信号相频特性	212
9.5 大信号响应测试的发展趋势	217
思考题	217
参考文献	218
第十章 光电子器件本征特性分析及其应用	220
10.1 本征响应特性分析的意义	220
10.2 激光器本征特性分析	222
10.2.1 光调制法	222
10.2.2 等效电路法	224
10.2.3 扣除法	228
10.2.4 三种方法的比较	231
10.2.5 不同温度下本征响应特性	232

10.3	光探测器本征特性分析	234
10.3.1	光探测器扣除法的原理	234
10.3.2	实验结果及分析	237
10.4	光调制器本征特性分析	238
10.4.1	扣除法获得电吸收调制器本征响应的原理	239
10.4.2	实验结果及分析	241
10.5	本征响应特性分析的应用	242
	思考题	242
	参考文献	243
第十一章	光谱与频谱分析技术	245
11.1	光谱与频谱特性分析的意义	245
11.2	借助电域测量获得光电子器件的特性	246
11.2.1	光外差技术的发展历程	246
11.2.2	光外差技术的应用	248
11.2.3	可调谐激光器调谐特性测量	252
11.2.4	瞬态光谱测量	253
11.2.5	啁啾系数和光纤色散的测量	254
11.3	借助光域测量获得光电子器件的特性	256
11.3.1	宽带光调制器频率响应的测量	256
11.3.2	高速激光器频率响应和啁啾系数的测量	257
11.3.3	激光器结温的测量	264
11.4	光注入对光电子器件响应特性的改善	270
11.4.1	光注入锁定技术发展历程	270
11.4.2	单纵模激光注入对DFB激光器频率响应的改善	273
11.4.3	光自注入对DFB激光器频率响应的改善	276
11.4.4	FP激光器光注入对FP激光器频率响应的改善	278
11.5	光谱与频谱分析技术的发展趋势	281
11.6	“鸡和蛋”问题的总结	281
	思考题	283
	参考文献	284
索引		288

第一章 绪 论

目前, 光纤通信和光网络已经成为日常生活和工作中不可缺少的一部分, 人们可以通过电子邮件、电话、电视等进行信息交流和数据传播, 在互联网上查寻信息和购物。由于信息技术的迅猛发展, 也带动了高速光电子器件的飞速发展。用于大容量高速率光通信的半导体光电子器件主要有激光器、光调制器和光探测器等, 其中光调制器主要是电吸收调制器并与作为光源的分布反馈 (DFB) 激光器集成在一起。现在, 光电子器件的响应速度已经成为大容量、宽带光网络的瓶颈, 迫切需要研究半导体光电子器件测试分析方法和封装设计。

1.1 器件封装设计的重要性

光电子器件主要的应用领域是光纤通信。在 20 世纪 90 年代初期, 光通信技术的主要用途仍然是电话、传真等。那时人们对通信容量的要求并不高, 上百兆速率的网络已经是宽带网了。对于这样低速率的光电子器件, 借助微电子器件发展起来的封装技术, 不难解决光电子器件的封装设计问题。因此, 人们将研究的重点主要放在光电子芯片的研制和生产上。随着光电子器件速率的不断提高, 普通微电子器件的封装技术已经不能满足光电子器件发展的要求, 人们开始借鉴微波器件的封装技术。高速光电子器件经历了与微电子非常类似的发展历程: 从 TO 封装二极管、蝶型封装到 BGA 封装的集成芯片, 到现在所有的光电子器件封装形式都有微电子封装的影子。

在过去很长一段时间里, 大家普遍认为提高光电子器件频率响应特性的关键在于芯片的设计与制作, 封装设计并不十分重要。正是因为有微电子器件的封装技术可以借用, 长期以来, 光电子器件的封装设计没有受到足够的重视。

其实, 国外早就开始注重器件的封装设计, IEEE 协会有封装方面专业委员会 (IEEE Components, Packaging, and Manufacturing Technology Society) 和学报 (IEEE Transactions on Advanced Packaging)。作者认为, 器件封装设计是实现高频性能的最后一步, 也是关键的一步。失败的封装设计将导致器件高频响应特性大大下降, 使得芯片研制的努力白费。为了提高器件的整体性能, 应该把器件的封装设计视为器件设计的一部分, 从芯片设计时就应该考虑器件的封装问题。比如芯片上电极焊盘的位置决定了金丝引线的长度, 电极焊盘大小取决于焊接技术和焊接设备, 电极焊盘的位置和大小选择应该与封装设计一同考虑。一项