

北京工业大学研究生创新教育系列著作



微波电子学

——材料电磁参数的表征与微波测量技术

Microwave Electronics

Measurement and Materials Characterization

[新加坡] L.F.Chen C.K.Ong C.P.Neo

[美] V.V.Varadan V.K.Varadan

著

陈欣欣 王群 译



科学出版社

北京工业大学研究生创新教育系列著作

微波电子学

——材料电磁参数的表征与微波测量技术

Microwave Electronics

Measurement and Materials Characterization

[新加坡] L. F. Chen C. K. Ong C. P. Neo 著

[美] V. V. Varadan V. K. Varadan

徐欣欣 王 群 译

科学出版社

北 京

图字：01-2015-1439 号

内 容 简 介

本书是微波电子测量领域中有关材料电磁参数测量方法的一部很有参考价值的专著。全书设置 12 章内容，其中，第 1 章材料的电磁特性、第 2 章材料表征的微波理论与技术是全书的基础篇章；第 3 章至第 7 章为全书的核心篇章，分别介绍了反射法、传输/反射法、谐振器法、谐振微扰法和平面电路法微波电子测量技术；第 8 章至第 12 章属于全书的提高篇章，分别对介电常数和磁导率张量、铁电材料、手性材料、微波电输运特性及材料高温介电特性的测量进行了专题介绍。

本书可供从事射频、微波、通信、固态器件和雷达的应用工程师和技术人员，以及微波工程、微电子和材料科学专业的大专院校的师生及研究人员学习和参考。

Copyright © 2004 John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate,
Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Microwave Electronics; Measurement and Materials Characterization, ISBN 978-0-470-84492-2, by L. F. Chen, C. K. Ong, C. P. Neo, V. V. Varadan, V. K. Varadan, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

图书在版编目(CIP)数据

微波电子学：材料电磁参数的表征与微波测量技术/（新加坡）L. F. 陈
（L. F. Chen）等著；徐欣欣，王群译．—北京：科学出版社，2016.9
（北京工业大学研究生创新教育系列著作）

书名原文：Microwave Electronics; Measurement and Materials Characterization
ISBN 978-7-03-049703-1

I. ①微… II. ①L… ②徐… ③王… III. ①微波电子学 IV. ①TN015

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 204487 号

责任编辑：周 涵 / 责任校对：钟 洋 邹慧卿
责任印制：张 伟 / 封面设计：迷底书装

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>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 9 月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2016 年 9 月第一次印刷 印张：36

字数：750 000

定价：198.00 元

（如有印装质量问题，我社负责调换）

译者序

随着微波技术的不断发展，材料电磁参数测量方法已成为电磁应用技术、电磁功能材料等相关领域发展进步的一个共性关键技术，许多新技术、新方法、新材料的产生和应用都离不开对材料电磁参数的了解以及材料电磁参数测量方法的掌握。

迄今为止，科研人员对材料微波频率特性已开展了大量的研究工作，并取得了一些研究成果。但是，文献资料表明，这些成果内容较为分散，很难为研究材料电磁参数测量方法的科研人员提供系统的理论指导和技术支持。这一状况对材料微波测量技术的发展十分不利，亟待解决。

由新加坡国立大学和美国宾夕法尼亚州立大学的科研工作者合作编著的《微波电子学——材料电磁参数的表征与微波测量技术》是迄今为止首部覆盖所有材料电磁参数测量方法的专著，书中提供了系统的微波电子学理论知识和全面的材料电磁测量基本原理、基本方法，对相关学科领域的科研及工程技术人员都有重要的参考价值。

在本书翻译过程中，得到了北京工业大学电磁防护与检测实验室的大力支持，金鑫、洪祥云、张龙定、胡涛春、姚晓明等同学参与了部分翻译和校验工作；同时，也得到了中国电子科技集团公司信息科学研究院领导和中国电子科技集团公司微系统技术总体中心同仁以及北京航天控制仪器研究所郝良彬博士的积极帮助；北京工业大学研究生院对本书的出版提供了经费资助，在此一并表示感谢！

由于书中涉及的内容非常广泛，兼之译者水平有限，对于翻译中的错误与不当之处，敬请读者谅解和指正。

译者

2016年6月于北京

原书前言

从通信设备到军事卫星装置，微波材料被广泛应用于各个方面。在固体物理学、材料科学、电气与电子工程领域，材料的微波特性以及微波功能材料的研究一直都是热点课题之一。近年来，随着高频、高速电路和系统技术的发展，需要对微波频段功能材料的性能进行全面理解。从各个角度来看，材料特性的表征已经成为微波电子学中的一个重要领域。

在微波频段对材料特性表征的研究有着悠久的历史，可以追溯到 20 世纪 50 年代初期。在过去的几十年里，在该领域的研究取得了显著的进步，开发并应用了一大批新的测量方法和技术。目前急需一本实践参考书，对产业界和研究者提供实际的指导。然而，我们已经意识到目前在领域缺乏好的参考书。虽然在这一领域已经出版了部分章节、综述和书籍，但这些资料通常只解决一个或几个专题，目前还没有发现覆盖所有最新测量方法的书籍。所以该领域的大部分研究和开发工作主要还是基于零散的报道和杂志信息，通常要耗费大量的时间和精力从浩如烟海的文献中搜集与项目相关的信息。此外，由于缺乏综合性教材，该领域的培训通常也不够系统，这种情况对该领域的长远发展和进步非常不利。

本书系统地论述了应用于材料特性表征的微波方法，全面介绍了材料表征中已经建立的成熟技术方法和新兴技术方法。该书同时描述了迄今为止文献中出现过的用于材料特性表征的所有微波方法。虽然本书主要面向设计材料特性表征方法的工程师，但对其他学科领域中想探究所使用微波测量方法能力和局限性的科研人员，如工业工程师、生物工程师和材料科学家等都有一定的参考价值。同时，本书还可以满足研究生及高年级本科生在材料特性表征方面对最新知识的学习要求。

本书最突出的优势就是覆盖面广，它几乎涵盖了在微波频段对材料电磁特性进行表征的所有微波理论和技术方法。在本书中，待表征的材料包括介电材料、半导体、导体、磁性材料和人工材料；待表征材料的电磁特性主要包括介电常数、磁导率、手征特性、传输特性和表面阻抗。

第 1 章和第 2 章为介绍性章节，主要是使读者分别从材料和微波的角度了解电磁材料研究和工程应用的基础。由于材料电磁特性的知识对于理解测量结果和纠正可能的误差非常有用，所以第 1 章介绍了各种电磁材料的常规属性和物理机制。在对材料特性表征的方法进行简要综述后，第 2 章对材料表征方法的基础微波理论进行了概述，尽管对微波理论的重要部分进行了大篇幅的介绍，但主要目的是给读者提供参考，而不是教程或者指南。参考文献的引用目的是使读者进一步学习他们感兴趣的专题。

第 3~8 章分析了低电导率材料介电常数和磁导率的测量以及高电导率材料表面阻抗的测量。第 3 章和第 4 章分别讨论了两种非谐振方法：反射法和传输/反射法；第 5 章和第 6 章分别讨论了两种谐振方法：谐振器法和谐振微扰法。在第 3~6 章所讨论的方法中使用的传

输线主要包括同轴线、波导和自由空间。第7章重点介绍了由平面传输线发展而来的测量方法，包括带状线、微带线和共面线。第3~7章所介绍的方法适用于具有标量或复数介电常数和磁导率的各向同性材料。各向异性介电材料的介电常数为张量参数，在外加直流磁场作用下磁性材料通常具有张量磁导率，第8章论述了介电常数和磁导率张量的测量。

铁电材料属于介电材料的特别分支，在微波电子领域经常用于电可调器件的开发，第9章讨论了铁电材料的测量，研究的主题包括温度依赖性和电场依赖性等介电特性。

近年来，人工材料是一个十分活跃的研究领域，第10章讨论了一种特殊类型的人工材料：手性材料。在介绍了手性材料的基本概念和特性后，讨论了手性材料的测量方法和可能的应用。

微波频段的电输运特性对于高速电子电路的开发非常重要，第11章讨论了用于测量低电导率、高电导率和磁性材料电输运特性的微波霍尔效应技术。

在高温下对材料特性的测量常应用于工业、科学研究、生物和医学领域。一般而言，本书中讨论的大部分方法都可以拓展到高温测量领域。第12章主要关注高温下材料介电常数的测量。高温下材料介电常数测量问题的解决方案同样可以应用到高温下材料的其他性能参数的测量中。

书中每一章的内容都可以作为一个独立的单元，这样做的目的就是使读者可以根据自己的研究项目快速获得感兴趣的信息。为了提供全面的信息，作者将大量的文献资料压缩为合理大小且易于阅读的报告，许多文献都被列入其中，以满足不同读者针对特定专题的深度追求或者对源文献的需求。

显而易见，材料表征方法的原理与实现这种方法本身需要的技术相比更为重要。如果我们能够理解测量方法的基本原理，就可以找到合适的方式去实现这些方法。虽然技术的进步可能会显著改变测量方法的实现方式，但并不会对测量原理产生重大影响。本书介绍了各种设计方法的基本原理，从而使读者能够理解在使用不同技术和方法进行实际设计中基本原理的应用过程。我们相信，只有熟悉材料性能表征基本概念和原理并具备将其应用到实际设计中的工程师，才最有可能充分利用并改进已有的方法以满足日益提高的测量需求。

在此需要指出，本书的编写由多人共同完成，我们无法对书中还在专利期的设计负责，同样对于新概念的提出者和新方法的发明人也无法一一授予合适的荣誉。书中的一些测量方法的命名可能与发明者不匹配或者没有准确反映这些方法的本质特征。我们希望这样的错误不会太多，同时非常感谢读者能够发现值得我们关注的错误。

在此我们要感谢为本书的出版做出努力的所有人士，由于空间有限，他们中只有一小部分人会得到正式的感谢。但是这并不表示其他没有列出姓名的人士所做的贡献受到忽视。在此将最诚挚的感谢献给新加坡国防科技局副局长官 Quek Gim Pew，新加坡 DSO 国家实验室首席执行官 Quek Tong Boon 以及新加坡国立大学 Temasek 实验室主任 Lim Hock 教授，感谢他们在本书编写过程中给予的鼓励和支持。同时感谢宾夕法尼亚州立大学和 HVS 科技给我们提供的 HVS 自由空间单元和数据。还要感谢 Li Zheng-Wen 博士、Rao Xuesong 博士和 Tan Chin Yaw 给我们提供的宝贵帮助与合作。最后还要感谢 John Wiley & Sons 的员工在本书出版过程中所做出的努力和专业化的付出。

目 录

译者序

原书前言

第 1 章 材料的电磁特性	1
1.1 微波频率下的材料研究和工程应用	1
1.2 电磁材料的物理学基础	2
1.2.1 微观尺度	2
1.2.2 宏观尺度	6
1.3 电磁材料的一般性能	12
1.3.1 介电材料	12
1.3.2 半导体	17
1.3.3 导体	18
1.3.4 磁性材料	20
1.3.5 超材料	26
1.3.6 其他类型的电磁材料	30
1.4 材料的内禀特性和外禀特性	34
1.4.1 内禀特性	34
1.4.2 外禀特性	34
参考文献	36
第 2 章 微波理论和材料表征技术	40
2.1 电磁材料微波表征方法概述	40
2.1.1 非谐振法	40
2.1.2 谐振法	42
2.2 微波传播	44
2.2.1 传输线理论	44
2.2.2 传输线史密斯圆图	55
2.2.3 导向传输线	59
2.2.4 表面波传输线	78
2.2.5 自由空间	89
2.3 微波谐振	93

2.3.1	引言	93
2.3.2	同轴谐振器	99
2.3.3	平面电路谐振器	102
2.3.4	波导谐振器	104
2.3.5	介质谐振器	112
2.3.6	开放式谐振器	124
2.4	微波网络	127
2.4.1	微波网络的概念	127
2.4.2	阻抗矩阵和导纳矩阵	128
2.4.3	散射参数	129
2.4.4	不同网络参数之间的转换	130
2.4.5	网络分析仪的基础知识	131
2.4.6	传输和反射特性测量	135
2.4.7	谐振特性测量	143
	参考文献	148
第3章 反射法		151
3.1	引言	151
3.1.1	开路反射	151
3.1.2	短路反射	152
3.2	同轴线反射法	153
3.2.1	终端开路孔隙	154
3.2.2	端接到层状材料的同轴探针	160
3.2.3	同轴线的单极探针	164
3.2.4	与圆波导相连的同轴线	166
3.2.5	屏蔽同轴线	168
3.2.6	端接同轴线的电介质谐振腔	170
3.3	自由空间反射法	171
3.3.1	自由空间测量的要求	171
3.3.2	短路反射法	171
3.3.3	可移动的金属垫板法	172
3.3.4	双站反射法	173
3.4	同时测量介电常数和磁导率的反射法	174
3.4.1	两种厚度法	174
3.4.2	不同位置法	175
3.4.3	组合法	176
3.4.4	不同背板法	176
3.4.5	频率变化法	177
3.4.6	时域法	178

3.5	表面阻抗测量	178
3.6	近场扫描探针	180
	参考文献	182
第4章	传输/反射法	186
4.1	传输/反射法理论	186
4.1.1	传输/反射法工作原理	186
4.1.2	Nicolson-Ross-Weir 算法	188
4.1.3	确定介电常数的精确模型	190
4.1.4	有效参数法	190
4.1.5	非线性最小二乘法	191
4.2	同轴空气线法	193
4.2.1	不同直径的同轴空气线	194
4.2.2	测量不确定度	194
4.2.3	扩大同轴线	197
4.3	空心金属波导法	199
4.3.1	不同工作频段的波导	199
4.3.2	不确定度分析	200
4.3.3	矩形波导中的圆柱杆	201
4.4	表面波导法	202
4.4.1	圆形介质波导	203
4.4.2	矩形介质波导	204
4.5	自由空间法	207
4.5.1	计算算法	208
4.5.2	自由空间 TRL 校准	210
4.5.3	不确定度分析	210
4.5.4	高温测量法	211
4.6	对传输/反射法的修改	212
4.6.1	不连续同轴线	213
4.6.2	传输线间的圆柱形谐振腔	213
4.6.3	双探针法	214
4.6.4	双线探针法	214
4.6.5	天线探针法	214
4.7	复电导率的传输/反射测量法	216
	参考文献	218
第5章	谐振器法	222
5.1	引言	222
5.2	介质谐振器法	222

5.2.1	Courtney 谐振器	223
5.2.2	Cohn 谐振器	228
5.2.3	圆径向谐振器	230
5.2.4	片谐振器	233
5.2.5	封闭金属屏蔽体中的介质谐振器	235
5.3	同轴表面波谐振器法	240
5.3.1	同轴表面波谐振器	241
5.3.2	开放同轴表面波谐振器	241
5.3.3	封闭同轴表面波谐振器	242
5.4	分离谐振器法	244
5.4.1	分离圆柱形谐振器法	244
5.4.2	分离同轴谐振器法	247
5.4.3	分离介质谐振器法	249
5.4.4	开放谐振器法	251
5.5	测量表面阻抗的介质谐振器法	255
5.5.1	表面电阻的测量	255
5.5.2	表面阻抗的测量	256
	参考文献	261
第 6 章 谐振微扰法		264
6.1	谐振微扰	264
6.1.1	基本理论	264
6.1.2	谐振腔形微扰	266
6.1.3	材料微扰	267
6.1.4	壁阻抗微扰	269
6.2	腔微扰法	270
6.2.1	介电常数和磁导率的测量	271
6.2.2	样品承载腔的谐振特性	272
6.2.3	腔微扰法的修正	276
6.2.4	腔外微扰法	279
6.3	介质谐振器微扰法	282
6.4	表面阻抗测量	283
6.4.1	表面电阻和表面电抗	283
6.4.2	表面电阻的测量	284
6.4.3	表面电抗的测量	290
6.5	近场微波显微镜	292
6.5.1	工作原理	292
6.5.2	尖端同轴谐振器	294
6.5.3	终端开路同轴谐振器	295

6.5.4 金属波导谐振腔	298
6.5.5 介质谐振器	298
参考文献	300
第7章 平面电路法	304
7.1 引言	304
7.1.1 非谐振法	304
7.1.2 谐振法	306
7.2 带状线法	307
7.2.1 非谐振法	307
7.2.2 谐振法	308
7.3 微带线法	314
7.3.1 非谐振法	314
7.3.2 谐振法	317
7.4 共面线法	325
7.4.1 非谐振法	326
7.4.2 谐振法	327
7.5 磁性薄膜磁导计	328
7.5.1 工作原理	328
7.5.2 两线圈法	329
7.5.3 单线圈法	331
7.5.4 阻抗法	332
7.6 平面近场微波显微镜	333
7.6.1 工作原理	334
7.6.2 电偶极子探针和磁偶极子探针	335
7.6.3 由不同类型的平面传输线制成的探针	336
参考文献	337
第8章 介电常数和磁导率张量的测量	341
8.1 引言	341
8.1.1 各向异性介质材料	341
8.1.2 各向异性磁性材料	343
8.2 介电常数张量的测量	345
8.2.1 非谐振法	346
8.2.2 谐振法	352
8.2.3 谐振-微扰法	355
8.3 磁导率张量的测量	359
8.3.1 非谐振法	359
8.3.2 法拉第旋转法	365

8.3.3	谐振法	372
8.3.4	谐振-微扰法	375
8.4	铁磁共振的测量	392
8.4.1	铁磁共振的起因	392
8.4.2	测量原理	393
8.4.3	谐振腔法	394
8.4.4	波导法	396
8.4.5	平面回路法	398
	参考文献	402
第9章	铁电材料的测量	405
9.1	引言	405
9.1.1	钙钛矿型结构	405
9.1.2	电滞回线	406
9.1.3	与温度的关系	406
9.1.4	与电场的关系	407
9.2	非谐振法	408
9.2.1	反射法	408
9.2.2	传输/反射法	409
9.3	谐振法	409
9.3.1	介质谐振器法	409
9.3.2	谐振腔-微扰法	412
9.3.3	近场微波显微镜法	413
9.4	平面电路法	413
9.4.1	共面波导法	414
9.4.2	共面谐振器法	417
9.4.3	电容器法	418
9.4.4	偏置方案的影响	429
9.5	铁电薄膜的响应时间	430
9.6	铁电薄膜的非线性行为和功率处理能力	432
9.6.1	脉冲信号法	433
9.6.2	相互调制法	434
	参考文献	437
第10章	手性材料的微波测量	439
10.1	引言	439
10.2	自由空间法	440
10.2.1	样品制备	441
10.2.2	实验程序	441

10.2.3	校准	442
10.2.4	时域测量	452
10.2.5	手性复合样品 ϵ , μ 和 β 的计算	455
10.2.6	手性复合材料的实验结果	460
10.3	波导法	469
10.3.1	样品制备	470
10.3.2	实验程序	470
10.3.3	手性复合样品 ϵ , μ 和 ξ 的计算	471
10.3.4	手性复合材料的实验结果	472
10.4	结束语	477
	参考文献	477
第 11 章	微波电传输特性测量	480
11.1	材料的霍尔效应和电传输特性	480
11.1.1	直流霍尔效应	481
11.1.2	交流霍尔效应	481
11.1.3	微波霍尔效应	481
11.2	微波霍尔效应测量的非谐振法	485
11.2.1	法拉第旋转	485
11.2.2	传输法	486
11.2.3	反射法	489
11.2.4	十字转门连接法	494
11.3	微波霍尔效应测量的谐振法	496
11.3.1	双正交谐振模式之间的耦合	496
11.3.2	MHE 谐振腔中材料的霍尔效应	498
11.3.3	MHE 谐振腔端板的霍尔效应	504
11.3.4	电介质 MHE 谐振器	505
11.3.5	平面 MHE 谐振器	507
11.4	磁性材料的微波电传输特性	508
11.4.1	常规和反常霍尔效应	508
11.4.2	双模谐振腔法	509
11.4.3	双模电介质探针法	510
	参考文献	511
第 12 章	材料高温介电特性测量	514
12.1	引言	514
12.1.1	材料的高温介电特性	514
12.1.2	高温测量方面的问题	516
12.1.3	高温测量方法概述	518

12.2	同轴线法	518
12.2.1	使用终端开路同轴探针测量介电常数	519
12.2.2	高温测量的相关问题	519
12.2.3	相移漂移校正	521
12.2.4	加载弹簧的同轴探针	523
12.2.5	金属化陶瓷同轴探针	524
12.3	波导法	524
12.3.1	终端开路波导法	525
12.3.2	双波导法	525
12.4	自由空间法	527
12.4.1	ϵ_r^* 的计算	529
12.5	腔微扰法	531
12.5.1	高温测量的腔微扰法	531
12.5.2	TE _{10n} 模式矩形腔	532
12.5.3	TM 模式圆柱腔	535
12.6	介质加载谐振腔法	541
12.6.1	重入式同轴腔	541
12.6.2	开放谐振器法	544
12.6.3	振荡法	546
	参考文献	549
	索引	553

第 1 章 材料的电磁特性

本章介绍了在微波频率范围的材料电磁特性的研究和工程应用；分别从微观和宏观尺度上讨论了材料和电磁场之间相互作用产生的物理机制；随后分析了典型电磁材料的一般性质，包括介电材料、半导体、导体、磁性材料和人工材料；最后讨论了电磁材料的内禀特性和外禀性能。

1.1 微波频率下的材料研究和工程应用

实验技术的发展决定了电磁材料的应用方式，与此同时，人们尝试用科学理论去解释材料的性能。材料在电磁场中的性能是由它们在电场中自由且有界的电子的位移和在磁场中原子的瞬时排列所决定的。只有通过使用理论和实验两种方法来揭示材料和电磁场之间的相互作用，才能深刻理解和充分利用电磁材料。

本书主要分析了微波电子学中电磁材料的表征方法，同时也讨论了在科学和工程的各个领域材料性能表征的应用技术。在微波频率下，对材料电磁特性研究的重要性可以从以下几个方面来理解。

第一，尽管在物理学中它不是一个新的领域，但是在微波频率下研究材料的电磁特性仍然具有重要的学术价值 (Solymar et al., 1998; Kittel, 1997; Von Hippel, 1995a, b; Jiles, 1994; Robert, 1988)，尤其是对磁性材料 (Jiles, 1998; Smit, 1971)、超导体 (Tinkham, 1996) 和铁电体 (Lines et al., 1977) 来说。通过微波测量得到的认识有助于了解材料的宏观和微观特性，因此微波技术在材料性质的研究中变得十分重要。虽然磁性材料在各个领域已经被广泛应用，但是对磁性材料的理论研究远落后于应用研究，这在某种程度上阻碍了磁性材料的应用。直到现在，在微波频率下磁性材料的电磁性能都没有被完全揭示，这也是微波电磁学的一个主要发展障碍。此外，超导体最有前景的应用之一就是微波电子产品。针对超导体微波性能的研究已经投入了大量的精力，同时还有许多方面有待探索。与此同时，近几年，随着铁电材料在发展智能电磁材料、结构和设备上所展现的巨大应用潜力，微波铁电性也有待进一步的深入研究。

第二，微波通信在军事、工业和日常生活中扮演着越来越重要的角色，同时微波工程需要材料在微波频率段电磁特性的精确表征 (Ramo et al., 1994)。自第二次世界大战 (简称二战) 以来，大量的资源被投入对电磁信号控制的研究，微波吸波材料被广泛应用于对目标雷达反射截面的减少。材料的电磁特性和复合材料电磁特性调控的能力对于雷达吸波材料和其他电磁功能材料结构的设计和开发非常重要 (Knott et al., 1993)。

第三，由于电子设备的时钟频率接近微波的频率，在电子器件、电路和封装中研究材

料的微波电磁特性是必不可少的。在微波频率段工作的电子元件的设计需要考虑在微波频率段的电传输性能，如霍尔迁移率和载流子浓度；在微波频率段工作的电子电路的开发需要考虑材料的精确本构特性，如介电常数和磁导率。同时，在进行电路和封装设计时应充分考虑电磁干扰（EMI）的影响并使用特殊的材料以确保达到电磁兼容（EMC）的要求（Montrose, 1999）。

第四，材料的电磁特性的研究在科学技术的各个领域都很重要。微波遥感的原理是基于不同的物体对于微波信号的反射和散射，同时物体的反射和散射特性主要是由它的电磁特性决定的。此外，电磁材料的研究得出的结论对于农业、食品工程、医疗、生物工程都有帮助（Thuery et al., 1992）。

最后，由于材料的电磁性能和材料的宏观或微观性能相关，人们可以通过材料的电磁特性获得自己感兴趣材料的宏观或微观性能。在材料的研究和工程应用中，材料性能表征的微波技术被广泛地应用于样品和产品生产过程的监控及无损检测（Zoughi, 2000；Nyfors et al., 1989）。

本章写作的目的是为理解电磁测量的结果提供基本的知识，在本章中会从微观和宏观尺度上给电磁材料一个总体介绍，并将讨论描述材料电磁性能的参数、电磁材料的分类以及典型的电磁材料的一般特性。各个主题的深层讨论，可以在以后的章节或引用的参考文献中找到。

1.2 电磁材料的物理学基础

在物理和材料科学中，对电磁材料的研究可以分为宏观和微观两种尺度（Von Hippel, 1995a, b）。在微观尺度上主要研究电子的能带、原子的磁矩和材料中的分子，在宏观尺度上主要研究电磁材料在外部电磁场中的响应。

1.2.1 微观尺度

在微观尺度下，材料的电性能主要是由材料的电子能带所决定的。根据价带和导带之间的能隙，材料可以分为绝缘体、半导体和导体。由于电子自旋和电子围绕原子核的轨道运行，原子具有了磁矩。根据磁矩对外磁场的响应，材料大致可以分为抗磁材料、顺磁材料和有序磁性材料。

1.2.1.1 电子能带

根据玻尔模型，原子的能级分布描述了它的特征。当原子聚合在一起形成固体时，分离的能级结合形成能带，在能带中电子的占有率符合 Fermi-Dirac 统计规律。图 1.1 显示了能带和原子间距的关系。当原子相互靠近时，能带扩大，且通常外侧能带扩展多于内侧能带。对某些元素（如锂），当原子间距减少时，能带扩展并与相邻能带合并，形成一个更宽的能带。而对于某些元素（如碳），当原子间隔进一步减小时，合并的能带还可以分离成独立的能带。

在 0K 时，金属中被能级占据的最高能带称为价带。价带可以完全或者部分被电子所填充。价带中的电子与它们的原子核相结合。导带是在价带之上的能带，在 0K 时包含空的能级。在导带中的电子称为自由电子，可以自由移动。在导带和价带之间存在一个禁

带，导带中自由电子的数量主要取决于禁带的宽度。如果禁带很宽，则可能不存在自由电子，这样的材料被称为绝缘体。在导体中，导带和价带可以重叠，从而允许在环境温度下存在大量的自由电子，因此得到较高的电导率。图 1.2 给出了绝缘体、半导体和导体中的能带结构。

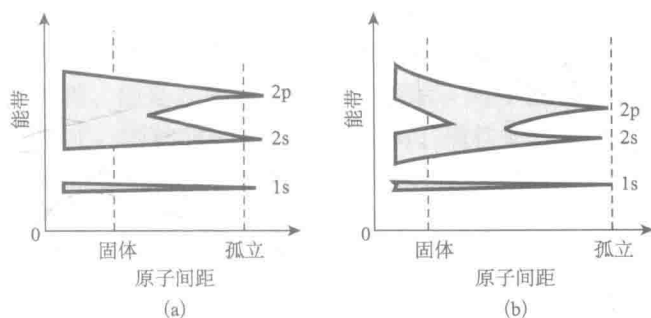


图 1.1 能带和原子间距的关系

(a) 锂的能带；(b) 碳的能带 (Bolton, 1992)

Source: Bolton, W. (1992). *Electrical and Magnetic Properties of Materials*, Longman Scientific & Technical, Harlow

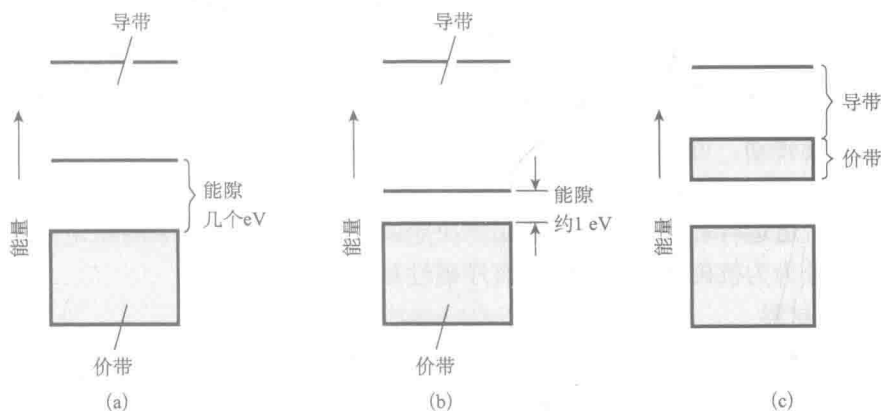


图 1.2 不同类型材料的能带

(a) 绝缘体；(b) 半导体；(c) 导体 (Bolton, 1992)

Modified from Bolton, W. (1992). *Electrical and Magnetic Properties of Materials*, Longman Scientific & Technical, Harlow

1) 绝缘体

对于大多数绝缘体，在它们的导带和价带之间的带隙宽度大于 5eV 。假设绝缘体没有磁性，此时的绝缘体可以称为电介质。金刚石即为碳的一种形式，是一个典型的电介质例子。碳在 $1s$ 轨道上有 2 个电子，在 $2s$ 轨道上有 2 个电子，在 $2p$ 轨道上有 2 个电子。在金刚石中，碳原子之间是通过共价键与相邻原子之间共用电子，每个原子在 $2p$ 轨道上共享 8 个电子 (Bolton, 1992)，因此所有的原子都是通过共价键紧密结合的。如图 1.1 (b) 所示，金刚石在价带和导带之间存在一个禁带。但应该指出的是，石墨是碳的另一种形式，它不是电介质而是导体。这是因为在石墨结构中的所有电子都不是以共价键结合，其中的一些电子可以传导。因此，能带不仅和原子结构有关，而且和原子结合的方式有关。