



装备科技译著出版基金

*Advanced Materials for Thermal
Management of Electronic Packaging*

电子封装

热管理先进材料

[美] 全兴存 (Xingcun Colin Tong) 著

安兵 吕卫文 吴懿平 译



Springer



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

电子封装热管理先进材料

Advanced Materials for Thermal Management of
Electronic Packaging

[美] 仝兴存(Xingcun Colin Tong) 著
安兵 吕卫文 吴懿平 译

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2012-170号

图书在版编目(CIP)数据

电子封装热管理先进材料 / (美) 仝兴存著; 安兵, 吕卫文, 吴懿平译. — 北京: 国防工业出版社, 2016. 4

书名原文: Advanced Materials for Thermal Management of Electronic Packaging

ISBN 978-7-118-10061-7

I. ①电… II. ①仝… ②安… ③吕… ④吴…
III. ①封装工艺—电子材料 IV. ①TN04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 071275 号

Translation from English language edition:

Advanced Materials for Thermal Management of Electronic Packaging

by Xingcun Colin Tong

Copyright © 2011 Springer New York

Springer New York is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

本书简体中文版由 Springer Science + Business Media 授权国防工业出版社独家出版发行。

版权所有, 侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市鼎鑫印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 27¼ 字数 615 千字

2016 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 139.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

自 20 世纪中叶人类进入信息时代以来,在电子和光子系统中,有效热管理一直是产品尺寸小型化、性能优良化、功能多样化以及有效增强可靠性的关键技术。越来越多的先进热管理材料在电子封装系统中的合理应用,已成为解决电子设备的散热问题,进而改进系统性能的有效途径。

特别是最近 30 年来,随着对尺寸小、成本低、功能多和效能高的电子元器件需求的不断增加,人们对各类电子元器件的散热性能的要求越来越高,不但要求热管理材料具有优异的散热性能,而且还要求同其他元器件相互匹配和兼容。为了适应这些需求,热管理材料以及相关的主动、被动和综合冷却技术已得到了空前的发展,从而为电子封装系统的热管理提供了具有高性价比并且能够统筹兼顾的各种系统性方案。

在这类技术发展的过程中,相继发表了大量有关高性能热管理材料的研究、开发和应用等方面的文章、演讲和专利,这些优异的工作为建立一个表征电子封装热管理材料的完整学科体系奠定了良好的基础。为了促进这一学科的建立,需要相关的专著对该领域的发展进行归纳和总结,为有关高等院校师生、相关学者和工程技术人员提供系统性的参考文献。基于此,笔者于 2008 年年初开始本书的写作,历时 3 年,2011 年年初由科技界久负盛名的施普林格(Springer)出版社出版,并列入其著名的“先进微电子技术”中。本书以印刷版和电子版同时在全球发行,成为该领域的第一本系统性著作,受到业界人士的广泛关注和好评。

中文译著在原著出版发行五年之后,由以擅长出版科技专著的国防工业出版社出版,我作为原著作者十分欣慰。华中科技大学安兵教授、吕卫文教授和吴懿平教授付出了巨大的努力翻译此书。翻译犹如再创作,我深深地感受到三位教授和出版社牛旭东编辑在过去三年中所做出的艰辛努力。衷心感谢他们的卓越工作以及他们身边亲朋好友的大力支持,使中文版顺利在国内面世。

日出江花红胜火,春来江水绿如蓝。值此春暖花开之际,我衷心希望这一译著的出版能为国内广大师生、同行,以及相关领域的专家学者提供有价值的参考资料,并为中国在电子封装热管理材料领域的发展做出贡献。身在异乡,难舍故土之情。借此机会,向国内的各位老师、同学、朋友和同行对我的所有支持和关心表示衷心的感谢,并祝愿各位家庭美满,健康幸福!

全兴存

2015 年冬于美国芝加哥

先进电子封装热管理材料的需求越来越广泛,因为热问题已成为电子工业中不断提高器件和系统性能的障碍。从有源电子扫描雷达阵列到网络服务器,对更小、能力更强、效率更高的电功率器件及系统的性能要求日益增加,这些都需要元器件更有效地散热。这就要求材料有很高的散热能力,并保持与芯片及电子封装的匹配。在这些关键性需求的驱动下,主动与被动冷却热管理材料和技术已取得革命性进步,现在已经可以提供集成度更高、更廉价的热管理解决方案。针对器件与封装级冷却和热管理中令人头痛的问题,人们发表了大量文章,但还没有全面系统、通俗易懂的书籍提供给高等院校学生、材料学家和电子工程师。

有鉴于此,本书系统阐述了热管理基础及材料选择评估中成本和性能的平衡。第1章从热传导理论概述开始,讨论热管理的解决方案、材料选择和元器件的设计。第2章对先进热管理材料和元器件的评估技术以及特性分析方法给出了全面的论述。第3章概述了当今高性能先进电子封装材料及其热管理功能,包括关键材料的性能、成熟状态、应用、加工和未来的发展方向。第4~8章对用量巨大并不断增加的先进热管理材料给出了深入的介绍,包括碳素材料、碳基复合材料、导热聚合物基复合材料、高热导率金属基复合材料、陶瓷复合材料和新兴的热界面材料。第9~11章讨论了散热片、风冷热沉、液体冷却和热电冷却装置的先进材料及设计。第12章介绍了先进电子封装热管理材料的应用前景和发展趋势。

非常感谢我的同事,他们给我提供了各种支持并且帮助我理解热管理材料与电子封装方法。我谨衷心地感谢本书的编辑 David Packer 博士和所有其他工作人员,感谢他们为本书出版付出的辛勤劳动。

全兴存

于美国伊利诺伊州绍姆堡

英语缩略语

缩略语	英文全称	中文含义
ABGA	Advanced ball grid array	先进球栅阵列
ABS	Acrylonitrile-butadiene-styrene	丙烯腈 - 丁二烯 - 苯乙烯
ACPI	Advanced configuration and power interface	高级配置与电源界面
AES	Auger electron spectroscope	俄歇电子光谱仪
AFM	Atomic force microscopy	原子力显微镜
AMC	Aluminum matrix composite/airborne molecular contamination	铝基复合材料/空气分子污染
APG	Annealed pyrolytic graphite	退火热解石墨
ASTM	American Society for Testing and Materials	美国测试与材料协会
BGA	Ball grid array	球栅阵列
BIOS	Basic input/output system	基本输入/输出系统
BIST	Built-in self-test	内建自测试
BLT	Bond line thickness	黏结线厚度
BSE	Back scattered electrons	背散射电子
BTE	Boltzmann particle transport equation	玻耳兹曼粒子运输方程
CAD	Computer aided design	计算机辅助设计
CBGA	Ceramic ball grid array	陶瓷球栅阵列
CCC	Carbon/carbon composite	碳/碳复合材料
CCD	Charge coupled device	电荷耦合器件
CCFL	Cold cathode fluorescent lamp	冷阴极荧光灯
CFCC	Continuous fiber ceramic composite	连续纤维陶瓷复合
CFD	Computational fluid dynamics	计算流体力学
CHF	Critical heat flux	临界热通量
CMC	Ceramic matrix composite	陶瓷基复合材料
CMOS	Complementary metal oxide semiconductor	互补金属氧化物半导体
CNF	Carbon nanofiber	碳纳米纤维
CNT	Carbon nanotube	碳纳米管
COB	Chip on board	板上芯片
COP	Coefficient of performance	性能系数
CPU	Central processing unit	中央处理器

(续)

缩略语	英文全称	中文含义
C-SAM	C-mode scanning acoustic microscope	C 模式扫描超声显微镜
CSF	Combination of solar and fuel cells	太阳能和燃料电池的组合
CTE	Coefficient of thermal expansion	热膨胀系数
CTI	Computer telephony integration	计算机电话集成
CVD	Chemical vapor deposition	化学气相沉积
CVI	Chemical vapor infiltration	化学气相渗透
CW	Continuous wave	连续波
dB	Decibel	分贝
DCB/DAB	Direct copper/aluminum bonded ceramic substrate	直接铜/铝键合陶瓷基板
DF	Density factor	密度系数
DFT	Density functional theory/discrete Fourier transform	密度泛函理论/离散傅里叶变换
DIP	Dual-in-line package	双列直插式封装
DLC	Diamond like carbon	类金刚石碳
DNA	Deoxyribonucleic acid	脱氧核糖核酸
DS	Decision support	决策支持
DSP	Digital signal processing	数字信号处理
DTM	Dynamic thermal management	动态热管理
ECU	Electronics cooling unit	电子冷却单元
EDA	Electronic design automation/electronic document access	电子设计自动化/电子文档访问
EDIFICE	Embedded droplet impingement for integrated cooling of electronics	嵌入式液滴撞击的电子集成冷却
EDM	Electrodischarge machining	放电加工
EDS	Energy dispersive spectroscopy of X-rays	X 射线能量色散谱
EELS	Electron energy loss spectrum	电子能量损失谱
EG	Electron gas	电子气
EIA	Environmental impact assessment	环境影响评价
EMA	Effective medium approximation	有效介质近似
EMC	Electromagnetic compatibility	电磁兼容性
EMI	Electromagnetic interference	电磁干扰
EMS	Electronic music studios	电子音乐工作室
EPDM	Ethylene propylene diene monomer	乙丙二烯单体
ESD	Electrostatic discharge	静电放电

(续)

缩略语	英文全称	中文含义
ESPI	Electronic speckle pattern interferometry	电子散斑干涉
EV	Electric vehicle	电动车
FCBGA	Flip chip ball grid array	倒装芯片球栅阵列
FEA	Finite element analysis	有限元分析
FET	Field effect transistors	场效应晶体管
FIT	Failure in time	单位时间内的失效率
FLG	Few layer graphene	数层石墨烯
FMEA	Failure mode and effect analysis	失效模式及影响分析
FPBGA	Flip chip plastic ball grid array	倒装芯片塑料球栅阵列
GAEC	Gas-assisted evaporative cooling	气体辅助蒸发冷却
GGI	Gold-gold interconnection	金-金互连
GLP	Graphite loaded polymer	石墨基聚合物
HAST	Highly accelerated stress test	高加速应力试验
HEV	Hybrid electric vehicle	混合动力电动汽车
HFE	Hydrofluoroether	氢氟醚
HIP	Hot isostatic press	热等静压
HOPG	Highly oriented pyrolytic graphite	高定向热解石墨
HPHT	High pressure and high temperature	高压和高温
HRTEM	High resolution transmission electron microscopy	高分辨透射电子显微镜
HVAC	Heating, ventilating, and air conditioning	暖通空调
HVOS	High-velocity oxyfuel spraying	高速氧燃料喷涂
Hz	Hertz	赫兹
IACS	International annealed copper standard	国际退火铜标准
IC	Integrated circuit	集成电路
ICA	Isotropic conductive adhesive	各向同性导电胶
ID	Inside diameter	内径
IGBT	Insulated-gate bipolar transistor	绝缘栅双极晶体管
IMS	Insulated metal substrate (metal core board)	绝缘金属基板(金属芯板)
IPEM	Integrated power electronics module	集成电力电子模块
IR	Infrared	红外线
JCPDS	Joint committee on powder diffraction standards	粉末衍射标准联合委员会
JTRS	Joint tactical radio system	联合战术无线电系统
LCD	Liquid crystal display	液晶显示器

(续)

缩略语	英文全称	中文含义
LCP	Liquid crystal polymer	液晶聚合物
LD	Laser diode	激光二极管
LDA	Laser diode array	激光二极管阵列
LED	Light-emitting diode	发光二极管
LEM	Lunar excursion module	登月车
LMA	Low melting alloy	低熔点合金
LRU	Line replaceable unit	可更换单元
MBLT	Minimum bond line thickness	最小键合线厚度
MCAD	Mechanical computer-aided design	机械计算机辅助设计
MEMS	Microelectromechanical system	微机电系统
MH	Metal hydride	金属氢化物
MIL	Military	军事
MLC	Multilayer ceramic	多层陶瓷
MMC	Metal matrix composite	金属基复合材料
MPU	Memory protection unit	内存保护单元
MRU	Modular refrigeration unit	模块化制冷机组
MSRS	Miniature scale refrigeration system	小型规模的制冷系统
MTBF	Mean time between failure	平均故障间隔时间
MTTF	Mean time to failure	平均无故障时间
MWNT	Multi-walled carbon nanotube	多壁碳纳米管
NEMS	Nanoelectromechanical systems	纳机电系统
NMP	Net material product/N-methylpyrrolidone	物质产品净值/N-甲基吡咯烷酮
OD	Outside diameter	外径
OEE	Overall equipment effectiveness	整体设备效率
OEM	Original equipment manufacturer	原始设备制造商
OPC	Object linking and embedding for process control	对象链接与嵌入的过程控制
OTD	On time delivery	准时交货
PAA	Polyacrylic acid	聚丙烯酸
PAI	Polyamideimide	聚酰胺
PAN	Polyacrylonitrile	聚丙烯腈
PBCA	Plastic ball grid array	塑料球栅阵列
PC	Polycarbonate/personal computer	聚碳酸酯/个人计算机
PCB	Printed-circuit board	印制电路板

(续)

缩略语	英文全称	中文含义
PCD	Polycrystalline diamond	聚晶金刚石
PCF	Phase change film	相变膜
PCM	Phase change material	相变材料
PCMA	Phase change metal alloy	相变合金
PDE	Partial differential equation	偏微分方程
PDP	Program data processor	项目数据处理器
PE	Polyethylene/postal explorer	聚乙烯/邮政资源浏览器
PEDOT;PSS	Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) poly(styrene-sulfonate)	聚(3,4-亚乙基)聚(苯乙烯磺酸盐)
PEEK	Polyaryletherketones	聚芳醚酮
PEI	Polyetherimides	聚醚
PEK	Polyaryletherketones	聚芳醚酮
PEM	Proton exchange membrane	质子交换膜
PES	Polyethersulfone	聚醚砜
PET	Polyethylene terephthalate/positron emission tomography	聚对苯二甲酸乙酯/正电子发射断层扫描
PFC	Perfluorinated chemicals/perfluorochemicals/power factor correction	全氟化学品/全氟化合物/功率因数校正
PG	Pyrolytic graphite	热解石墨
PGA	Pin grid array	针脚栅格阵列
PI	Polyimides	聚酰亚胺
PIP	Polymer infiltration and pyrolysis	高分子渗透和热解
PLD	Pulsed laser deposition	脉冲激光沉积
PM	Preventive maintenance	预防性维护
PMC	Polymer matrix composite	聚合物基复合材料
PMMA	Poly methyl methacrylate	聚甲基丙烯酸甲酯
POM	Polyoxymethylene	聚甲醛
PPO	Polyphenylene	聚苯
PPS	Polyphenylene sulfide	聚苯硫醚
PSA	Pressure sensitive adhesive	压敏胶
PSH	Polymer solder hybrid	聚合物焊料混合物
PSS	Plasma sound source or polystyrene sulfonic acid	等离子体声源或聚苯乙烯磺酸
PSul	Polysulfone	聚砜
PTC	Positive temperature coefficient	正温度系数

(续)

缩略语	英文全称	中文含义
PTFE	Polytetrafluoroethylene	聚四氟乙烯
PV	Photovoltaic	光伏
PVA	Polyvinyl alcohol	聚乙烯醇
PWB	Printed-wire board	印制线路板
PyC	Pyrocarbon	热解炭
QDSL	Quantum dot superlattice	量子点超晶格
QFP	Quad flat package	四方扁平封装
RIM	Reaction injection molding	反应注射成型
RMI	Reactive melt infiltration	反应熔渗
RoHS	Restriction of hazardous substances	有害物质限制
RTM	Resin transfer molding	树脂传递模塑
SAM	Scanning acoustic microscopy	扫描超声显微镜
SEM	Scanning electron microscope	扫描电子显微镜
SFF	Small form factor	小外形
SiC	Silicon carbide	碳化硅
SiP	System in package	系统级封装
SIP	Slurry infiltration process	浆料渗透工艺
SLS	Reaction-bonded SiC with laser sintered process	用激光烧结工艺制造的反应烧结碳化硅
SMA	Shape memory alloy	形状记忆合金
SMT	Surface mount technology	表面贴装技术
SOC	System on a chip	系统芯片
SOI	Silicon on insulator	绝缘体上硅
SPM	Scanning probe microscopy	扫描探针显微镜
STD	Standard	标准
SUB	Single vacuum bag	单真空袋
SWNT	Single walled carbon nanotube	单壁碳纳米管
TAB	Tape-automated bonding	载带自动键合
TBGA	Tape ball grid array	载带球栅阵列
TE	Thermoelectric	热电
TEC	Thermoelectric cooler	热电致冷器
TEM	Transmission electron microscopy	透射电子显微镜
TGF	Thermal gap filler	热填缝剂
TIM	Thermal interface material	热界面材料

(续)

缩略语	英文全称	中文含义
TML	Total mass loss	总质量损失
TPE	Thermoplastic elastomer	热塑性弹性体
TPS	Thermal protection system	热防护系统
TPU	Thermoplastic polyurethane	热塑性聚氨酯
TQFP	Tape-bonded quad flat package	载带键合四边扁平封装
TTR	Transient thermal reflectance	瞬态热反射率
ULSI	Ultra large scale integration	超大规模集成
UV	Ultraviolet light	紫外线
VCC	Vapor compression cooling	蒸汽压缩制冷
VCM	Volatile condensable material	挥发性可冷凝材料
VGCF	Vapor grown carbon fiber	气相生长碳纤维
VGCNF	Vapor grown carbon nanofiber	气相生长碳纳米纤维
VPE	Vapor phase epitaxy	气相外延
VR	Virtual reality	虚拟现实
VRLA	Valve regulated lead acid	阀控式密封铅酸
WBG	Wide band gap	宽禁带
WEEE	Waste electrical and electronic equipment	废电器及电子设备
WIP	Work in progress	工作正在进行中
ZT	Dimensionless thermoelectric figure of merit	无量纲热电品质因数

第 1 章 电子封装热管理基础与设计指南	1
1.1 热管理基本理论	1
1.1.1 集成电路工作的热源和热效应	2
1.1.2 热膨胀系数不同引起的热失效	3
1.1.3 热失效率	4
1.1.4 热管理面临的挑战和存在的普遍问题	4
1.2 不同封装层级的热管理总体现状	6
1.2.1 芯片级封装热管理	7
1.2.2 板卡级封装热管理	8
1.2.3 系统级封装热管理	10
1.3 热管理方案	10
1.3.1 硬件解决方案	11
1.3.2 软件解决方案和基于软件的动态热管理	13
1.3.3 优化的封装散热设计	15
1.4 电子封装中热传导和热计算的基本原理	17
1.4.1 热传导	17
1.4.2 热对流	19
1.4.3 辐射	20
1.4.4 电子封装中多种热传导状态	22
1.4.5 微尺度热传导	23
1.5 先进的电子封装热管理设计	24
1.5.1 热设计准则	24
1.5.2 热特性建模与模拟	26
1.5.3 实验验证	29
1.6 先进热管理的材料选择	29
1.6.1 界面连接材料	30
1.6.2 传热和散热的块体材料	30
1.6.3 材料和器件集成	31
1.7 热管理材料的环保性	33
1.7.1 RoHS 条例	33

1.7.2	WEEE 条例	34
1.8	结语	35
	参考文献	36
第2章	热管理材料的表征方法	38
2.1	热性能及其测量技术	38
2.1.1	热传导和热扩散	38
2.1.2	热膨胀系数	44
2.1.3	比热容	45
2.1.4	抗热冲击	45
2.1.5	微纳米材料的热特性	47
2.2	电性能和测量技术	52
2.2.1	电导率和电阻率	52
2.2.2	介电常数及其表征	54
2.3	热力学表征	54
2.3.1	热感应应力和应变的表征技术	55
2.3.2	变形体的基本方程	58
2.3.3	本构行为	59
2.3.4	热力学分析	61
2.3.5	热力学失效	66
2.4	材料特性分析技术	68
2.4.1	光学显微镜	68
2.4.2	X 射线衍射	69
2.4.3	扫描电子显微镜	71
2.4.4	透射电子显微镜	71
2.4.5	扫描声学显微镜	73
2.4.6	原子力显微镜	74
2.5	表面粗糙度要求和接触界面的兼容性	76
2.5.1	腐蚀和抗氧化保护	76
2.5.2	表层结构的可焊性	78
2.5.3	咬合循环周期和作业环境对接触表面处理层的影响	79
2.5.4	电化学腐蚀和接触界面的兼容性	79
2.6	可靠性分析和环境绩效评估	80
2.6.1	失效模式和机制	80
2.6.2	可靠性认证	81
	参考文献	83

第 3 章 电子封装材料及其在热管理中的功能	85
3.1 电子封装中的材料选择	85
3.2 金属材料	86
3.2.1 单金属	86
3.2.2 金属基复合材料	89
3.3 陶瓷和半导体材料	91
3.4 电子玻璃	93
3.5 聚合物	95
3.5.1 热塑性塑料	95
3.5.2 热固性材料	98
3.5.3 弹性体	100
3.6 混合材料层压板	100
3.6.1 多层材料	100
3.6.2 金属层压材料	101
3.7 PCB 材料	102
3.8 热界面材料	104
3.9 低导热性材料	106
3.10 先进导热性材料	106
参考文献	108
第 4 章 单片碳素材料和碳基复合材料	110
4.1 引言	110
4.2 天然石墨和工业石墨	113
4.3 热解石墨	115
4.4 碳石墨泡沫	117
4.4.1 制造工艺	117
4.4.2 热导率和热转化	119
4.5 热导碳纤维	120
4.6 金刚石	123
4.7 碳纳米管	126
4.8 石墨烯	129
4.9 碳-碳复合材料	129
4.10 结语	131
参考文献	131

第 5 章 聚合物基导热复合材料	133
5.1 引言	133
5.2 聚合物基体类型	134
5.3 导电高分子材料的增强相	137
5.4 导热高分子复合材料的设计与建模	139
5.4.1 理论模拟	140
5.4.2 计算机建模	142
5.4.3 渗流理论	144
5.5 聚合物基复合材料的一般制造和生产流程	145
5.6 热管理典型应用	148
5.6.1 聚合物碳纤维复合材料	148
5.6.2 聚合物-金属复合材料	149
5.6.3 聚合物-陶瓷复合材料	149
5.6.4 聚合物基纳米复合材料	151
5.7 结语	153
参考文献	154
第 6 章 高热导率金属基复合材料	156
6.1 引言	156
6.2 金属基复合材料的制备	157
6.2.1 固态法	157
6.2.2 液态法	160
6.2.3 原位制备方法	162
6.2.4 共沉积制备法	163
6.3 铝基复合材料	163
6.3.1 铝-硼复合材料	164
6.3.2 铝-石墨复合材料	164
6.3.3 铝-金刚石复合材料	165
6.3.4 铝-碳化硅复合材料	166
6.3.5 铝-硅复合材料	168
6.4 铜基复合材料	169
6.4.1 铜-石墨复合材料	169
6.4.2 铜-碳纳米纤维复合材料	171
6.4.3 铜-碳化硅复合材料和铜-金刚石复合材料	172
6.5 其他金属基复合材料	177
6.5.1 铍复合材料	178

6.5.2	银-金刚石复合材料	180
6.5.3	低热膨胀系数复合焊料	181
6.6	结语	182
	参考文献	183
第7章	导热陶瓷基复合材料	185
7.1	引言	185
7.2	碳化硅基陶瓷复合材料的工艺现状	186
7.3	碳化硅-金刚石复合材料	189
7.4	碳化硅-碳复合材料	192
7.5	反应烧结碳化硅复合材料	194
7.6	铝增韧碳化硅	196
7.7	纳米陶瓷复合材料	197
7.8	陶瓷基复合材料的热防护系统	200
7.9	结语	202
	参考文献	203
第8章	电子封装中的热界面材料	205
8.1	联合热导以及热界面材料的选择	205
8.1.1	联合热导	206
8.1.2	热界面材料的选择标准	207
8.2	金属热界面材料	211
8.2.1	回流焊焊料和焊线制程	212
8.2.2	非回流焊焊料和相变金属合金	214
8.2.3	复合焊料和混合金属热界面材料	217
8.2.4	金-金互连	226
8.3	有机热界面材料	228
8.3.1	导热弹性体材料	229
8.3.2	热油脂和化合物	231
8.3.3	相变材料	232
8.3.4	聚合物焊料混合材料	235
8.4	石墨基热界面材料	237
8.5	先进的热界面材料	238
8.5.1	纤维增强的热界面材料	238
8.5.2	基于纳米技术的热界面材料	241
8.6	热界面材料的选择和应用	245
8.6.1	商业热界面材料的选择和应用	245