

高等学校教材

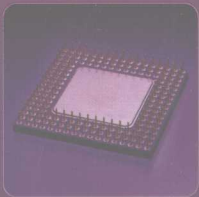
DIANZI YUANJIQIAN
JIQI CAILIAO GAILUN

黄新友 高春华 主编

电子元件



及其材料概论



化学工业出版社

高等学校教材

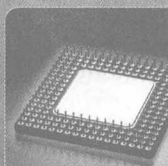
DIANZI YUANQIGUAN
JIE CALIAO GAILUN

黄新友 高春华 主编

电子元件



及其材料概论



化学工业出版社

·北京·

本书比较系统地介绍了各类电子元器件的工作原理、制造工艺、基本特性、选用的材料和应用情况。同时对一些新的微电子技术和表面组装技术也作了介绍。特点是实用性强,涵盖面宽,介绍详略得当。书中既有相关材料的重要理论叙述,又结合这些材料与当前的发展趋势作了必要的介绍。

全书共分十三章,第一章为概述,第二章介绍了压电元器件及其材料,第三章介绍了热释电红外探测器及其材料,第四章介绍铁电器件及其材料,第五章介绍压敏元器件及其材料,第六章介绍热敏元器件及其材料,第七章讲述湿敏元器件及其材料,第八章讲述气敏元器件及其材料,第九章讲述光敏元器件及其材料,第十章介绍的是磁敏元器件及其材料,第十一章介绍的是力敏器件及其材料,第十二章介绍了其它敏感元器件及其材料,第十三章介绍了阻、容、电感元器件及其材料。

本书可供从事材料科学、电工、电子、仪表、自动化等方面工作的中、高级科技人员参考,也可作为电子信息材料、电子材料及元件、无机非金属材料工程专业的大学本科和研究生教材,同时也可供相关领域工程技术和研究人员及相近专业研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子元器件及其材料概论/黄新友,高春华主编. —北京:
化学工业出版社, 2009. 5

高等学校教材

ISBN 978-7-122-05072-4

I. 电… II. ①黄…②高… III. ①电子元件-高等学校-
教材②电子器件-高等学校-教材 IV. TN6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 038374 号

责任编辑:杨 菁

文字编辑:林 丹

责任校对:洪雅姝

装帧设计:张 辉

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装:北京云浩印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 21½ 字数 551 千字 2009 年 6 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:38.00 元

版权所有 违者必究

前 言

能源、信息和材料是当代科学发展的三大支柱，而电子元器件是当今信息时代的源头，材料又是能源与信息的载体及依托，没有它就无法进行能量和信息的转换、传输与利用。半导体敏感技术是一门新兴技术，各种电子元器件及其传感器日新月异，在国民经济和国防各领域发挥着不可替代的作用，在人们的日常生活中也得到越来越广泛的应用。在当今信息和知识经济时代，电子元器件及其材料已成为世界各国的重要经济增长点，推动着全球经济蓬勃发展。

电子元器件及其传感器能够把力、热、光、磁、气、湿度、射线、离子等物理、化学和生物等非电量转换成电信息。它具有体积小、精度高、灵敏度高、成本低、便于集成化、多功能化、易与微机接口等特点，不仅广泛用于航空、航天和航海等国防尖端工业建设、工农业生产、交通监控、灾害报警、医疗监护、自动控制和机器人、生命与宇宙科学研究，还广泛用于民用工业和日常家用电器等各个领域，如通信和家庭电子类消费产品，以满足人们日益增长的对信息、娱乐和医疗保健等方面的需求。特别是作为摄取信息的功能部件，它已成为计算机检测与控制系统中不可缺少的重要组成部分，越来越受到人们的普遍重视。

本书根据我国高等教育学科的发展形势，以拓宽专业口径、增强适应性和大力培养具有创新能力的复合型人才为目的，根据“电子元器件及其概论”的教学大纲要求编写而成。在讲义的基础上进行了扩充修订，原则是减少过多的理论分析和计算，增加了新型电子元器件及其材料的内容。力求贯彻“加强基础，拓宽专业面”的指导思想。合理调整了全书的结构，使其更适用，应用范围更广。

本教材比较全面地介绍了压电、热释电、铁电、压敏、热敏、湿敏、气敏、光敏、磁敏、力敏和阻、容、电感以及其它有关的电子元器件及其材料。主要内容为各种电子元器件的工作原理、结构、特点、应用和发展动态，以及相关材料方面的介绍。书中重点介绍了半导体陶瓷及其有关敏感元件的基本知识，着重论述了压敏、热敏、气敏、湿敏及光敏半导体陶瓷及其应用。对每一类敏感半导体陶瓷又分别从成分、结构、工艺、敏感机理、适用场合及电路举例等方面加以介绍，为各类电子元器件的制造、改性及应用提供了必要的理论基础。

本书具有如下特点：全部按电子元器件分章，内容集中，器件新颖，系统性强，条理清晰，结构严谨，兼顾理论与实用，涵盖面广。每章后均附有小结和思考题，内容的选取反映了我国目前工业生产和科学研究的实际。

该书可供从事材料科学、电工、电子、仪表、自动化等方面工作的中、高级科技人员参考，也可作为电子信息材料、电子材料及元件、无机非金属材料工程专业的大学本科和研究生教材，同时也可供相关领域工程技术和研究人员及相近专业研究生参考。

本书由江苏大学黄新友教授和高春华高级实验师主编。同时对在编写过程中提出宝贵意见和给予大力支持的教研室老师表示衷心的感谢。

由于编写此书的参考资料众多，限于篇幅，未能一一列出，在此向参考资料的作者致敬和感谢。鉴于作者学识和经验所限，书中错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

黄新友、高春华
于江苏大学

目 录

第一章 概述	1
第一节 电子材料的分类和特点	1
一、电子材料的分类和特点	1
二、电子材料对环境的要求	3
三、电子材料与元器件	4
第二节 电子元器件的种类及其作用	5
一、元器件的种类及其作用	5
二、分立电子元器件及其应用	8
第三节 电子元器件材料的应用与展望	10
本章小结	17
思考题	17
第二章 压电元器件及其材料	18
第一节 压电效应概述	18
一、第一类压电方程	18
二、其它压电方程组	20
三、压电材料性能参数	21
第二节 常用压电材料	22
一、压电晶体	22
二、压电陶瓷	23
三、其它压电材料	24
第三节 压电振子	25
一、压电振子的振动模式	25
二、压电振子的基本特性与主要参数	29
三、压电振子性能的稳定性	33
四、压电振子的假响应	34
第四节 压电器件工艺基础简述	35
一、晶体加工工艺	36
二、压电陶瓷制造工艺	36
三、平面薄膜制造工艺简介	40
第五节 石英晶体器件	42
一、石英谐振器	42
二、分立式单节晶体滤波器	45
三、单片晶体滤波器	49
四、晶体振荡器	49
五、其它石英晶体器件	50
第六节 陶瓷滤波器	52
一、简述	52
二、分类	52
三、梯型带通滤波器	52
四、桥型带通滤波器	54
五、带通滤波器的设计制作	55
六、带阻滤波器	57
七、其它陶瓷滤波器	58
第七节 叉指换能器	59
一、表面波技术的特点	59
二、信号的处理	59
三、表面波的激发的方法和检测	59
四、叉指换能器的特点	59
五、声表面波器件的制造工艺流程	60
六、声表面波延迟线	60
七、声表面波滤波器 (SAWF)	60
八、其它声表面波器件	61
第八节 其它压电器件	62
一、压电陶瓷水声换能器	62
二、压电超声波换能器	64
三、压电变压器	65
四、压电陶瓷电光器件	66
五、压电传感器	67
六、热释电红外探测器	68
七、总结	68
第九节 片式压电元器件	69
一、片式表面波滤波器	69
二、片式滤波器	69
三、片式振荡器	69
四、片式延迟线	69
五、叠层压电陶瓷	70
本章小结	70
思考题	70
第三章 热释电红外探测器及其材料	71
第一节 热释电效应	71
第二节 热释电材料及应用	71
一、热释电红外探测器	72
二、热释电陶瓷	73
第三节 热释电红外探测器	74
第四节 薄膜型热释电红外探测器	76
本章小结	77
思考题	77
第四章 铁电器件及其材料	78

第一节 铁电体概述	78	二、热敏电阻的结构	113
一、铁电体和电滞回线	78	第二节 热敏电阻的主要特性和参数	114
二、铁电特性与晶体结构	79	一、主要特性	114
三、反铁电特性	80	二、热敏电阻的主要参数	117
四、相变与临界现象	82	三、工作点的选择	118
第二节 铁电材料	82	第三节 PTC 热敏电阻材料	118
一、铁电材料	82	一、BaTiO ₃ 系陶瓷	119
二、BaTiO ₃ 的介电特性及掺杂改性	83	二、氧化钒系 PTC 热敏材料	121
第三节 铁电陶瓷致动器	85	第四节 NTC 热敏电阻材料	121
第四节 铁电光器件	87	一、NTC 热敏材料的导电机理	121
第五节 集成化铁电器件	90	二、常温 NTC 热敏电阻材料（二元系 和多元系氧化物）	122
本章小结	92	三、高温 NTC 热敏陶瓷	125
思考题	93	四、低温 NTC 热敏电阻材料	126
第五章 压敏元器件及其材料	94	第五节 CTR 热敏电阻材料	127
第一节 压敏电阻的原理和特性	94	第六节 热敏电阻的应用	128
一、工作原理	94	一、应用概述	128
二、压敏元器件的特性	96	二、热敏电阻的具体应用	129
第二节 压敏电阻器材料	98	三、应用原理分析	130
一、ZnO 系压敏电阻陶瓷	98	四、测量电路	131
二、SiC 系和 BaTiO ₃ 系压敏电阻陶瓷 材料	100	五、其它应用	134
三、压敏电阻器材料	100	第七节 热敏电阻的制造工艺过程和型号 命名	136
第三节 压敏元件的生产过程	101	一、PTC 热敏电阻制造工艺过程	136
第四节 压敏元器件的应用	102	二、PTC (NTC) 热敏电阻型号命名 方法	136
一、过电压保护	103	三、生产厂家及其型号	136
二、其它应用	105	第八节 片式热敏元件	137
第五节 压敏元器件的发展动态	107	一、片式 NTC	137
第六节 片式压敏电阻	108	二、片式 PTC	138
一、树脂模塑型片式压敏电阻 （整体式）	108	第九节 SiC 薄膜热敏电阻	138
二、被覆树脂/玻璃方式的片式压敏 电阻	109	一、结构和基本特性	138
三、叠层型片式压敏电阻	109	二、主要工艺方法	139
四、材料及动态	109	本章小结	139
五、厚膜印刷型片式压敏电阻	110	思考题	139
第七节 压敏电阻器的型号标示及使用 注意事项	110	第七章 湿敏元器件及其材料	140
一、压敏电阻器的型号标示	110	第一节 湿敏元器件的种类	140
二、使用注意事项	110	一、湿度元器件的分类	140
三、压敏电阻器生产厂家及其型号	111	二、金属氧化物半导体陶瓷湿敏电阻器 工作原理及特性	141
本章小结	111	第二节 湿度的表示方法和特性参数	141
思考题	111	一、湿度的表示方法	141
第六章 热敏元器件及其材料	112	二、湿度敏感器件的特性参数	142
第一节 热敏电阻的工作原理	112	第三节 湿敏材料	143
一、热敏电阻工作原理	112	一、湿敏材料的技术参数及特性	143

二、瓷粉膜湿敏电阻	144	一、SnO ₂ 系	180
三、烧结型湿敏电阻	144	二、ZnO 系	182
四、厚膜湿敏电阻	146	三、Fe ₂ O ₃ 系	183
五、结露传感器	146	四、ZrO ₂ 系	183
六、羟基磷灰石湿敏陶瓷	146	五、TiO ₂ 系	184
七、改善陶瓷湿敏特性的方法	147	六、气敏材料的发展	184
第四节 烧结型半导体陶瓷湿度敏感 器件	147	第四节 SnO ₂ 系半导体气敏器件	185
一、烧结型半导体陶瓷敏感器件	148	一、烧结型 SnO ₂ 半导体气敏器件制备 工艺	185
二、烧结型半导体陶瓷敏感器件特点 综述	151	二、SnO ₂ 气敏器件检测气体机理	188
第五节 涂覆膜型陶瓷湿度敏感器件	152	第五节 ZnO 系半导体气敏器件	190
一、涂覆膜型 Fe ₃ O ₄ 湿敏器件的制备	152	一、ZnO 气敏器件的制作	191
二、涂覆膜型 Fe ₃ O ₄ 湿敏器件的性能	152	二、ZnO 气敏器件的特性	192
三、涂覆膜 Al ₂ O ₃ 湿敏器件	153	三、ZnO 气敏器件的改进	192
第六节 多孔氧化物湿敏器件	153	第六节 Fe ₂ O ₃ 半导体气敏器件	194
一、多孔 Al ₂ O ₃ 湿敏器件	153	一、氧化铁系气敏器件的制造方法	194
二、微型多孔 SiO ₂ 湿敏器件	156	二、氧化铁系气敏器件的工作原理	194
第七节 元素半导体、结型和 MOS 型湿 敏器件	156	三、氧化铁系气敏器件的特性	195
一、元素半导体湿敏器件	157	第七节 Nb ₂ O ₅ 和 ZrO ₂ 系氧敏器件	197
二、结型和 MOS 型湿敏器件	159	一、Nb ₂ O ₅ 氧敏器件	197
三、化合物湿敏电阻器	160	二、ZrO ₂ 氧敏器件	200
第八节 湿敏元器件的应用	160	第八节 其它气敏器件	200
一、湿敏器件对电源的要求	161	一、V ₂ O ₅ 系半导体气敏器件	200
二、湿敏器件的应用	161	二、CoO 系氧敏器件	200
三、露点传感器	163	三、复合氧化物系气敏器件	201
四、自动去湿器	163	四、有机半导体气敏器件	201
五、自动烹调湿度检测系统	163	第九节 半导体气敏器件的发展	202
六、电容式湿度传感器的应用	164	第十节 气敏器件的应用	204
七、SMC-2 型湿度传感器的应用	165	一、应用类型	204
本章小结	167	二、应用实例	205
思考题	167	本章小结	207
第八章 气敏元器件及其材料	168	思考题	208
第一节 气敏元器件的分类	169	第九章 光敏元器件及其材料	209
一、半导体气敏器件的分类	170	第一节 基础知识	209
二、各种气敏器件的结构	171	一、光电导效应	209
第二节 半导体气敏器件的工作机理和特性 参数	174	二、光生伏特效应	209
一、气体的检测机理	174	三、外光电效应	209
二、半导体气敏器件的工作原理	174	第二节 光敏器件的基本特性	210
三、标志器件性能的主要特性参数	176	第三节 光敏器件及其材料	212
四、几种半导体气敏器件的主要参数	177	一、光敏电阻	212
五、半导体气敏器件的应用	177	二、非晶硅光敏元件	216
第三节 气敏材料	180	三、光电二极管	217
		四、光电三极管	218
		五、光电场效应管	218
		六、光电池	218

第四节 光敏元件的制造工艺	221	六、电容式压力传感器	257
一、光敏电阻的制造工艺	221	第二节 半导体力敏二极管和三极管	257
二、 $\text{Cu}_2\text{S}-\text{CdS}$ 陶瓷太阳能电池制造 工艺	222	一、半导体力敏二极管	257
三、 $\text{CdTe}-\text{CdS}$ 陶瓷太阳能电池制造 工艺	224	二、半导体力敏三极管	258
第五节 光电元器件的应用	225	三、结型场效应力敏器件	259
一、光电转速传感器	225	四、MOSFET 力敏器件	260
二、光电测微计	225	第三节 力敏材料	261
三、烟尘浊度连续监测仪	226	一、主体材料	261
四、利用 CdS 光敏元件的检测电路	226	二、掺杂材料	265
五、光敏晶体管光检测电路	227	三、力敏材料的发展方向	266
六、光自动控制电路	227	第四节 力敏器件的应用	266
七、光电耦合器件	227	一、半导体应变片的应用	266
八、热电型光传感器	229	二、力学量传感器的应用	267
本章小结	229	三、普通电声传感器	270
思考题	230	四、次声（水声）传感器	273
第十章 磁敏元器件及其材料	231	五、超声传感器	279
第一节 霍尔元件	231	本章小结	285
一、霍尔效应	231	思考题	285
二、霍尔元件的结构及参数	232	第十二章 其它敏感元器件及其材料	286
第二节 霍尔元件的特性	233	第一节 生物敏感元器件及其材料	286
一、霍尔元件的特性	233	一、生物传感器的结构	286
二、不同材料的霍尔元件的特点	237	二、酶传感器和微生物传感器	286
第三节 磁阻电阻器及其磁敏器件	237	三、免疫传感器	288
一、磁敏电阻器	237	四、生物电子传感器	288
二、磁敏晶体管	239	五、光生物传感器	288
三、磁敏电位器	240	六、基因传感器	289
第四节 磁敏材料	241	第二节 色敏元器件及其材料	289
一、半导体磁敏电阻材料	242	一、半导体色敏传感器的基本原理	289
二、强磁性薄膜磁敏材料	244	二、半导体色敏传感器的基本特征	291
第五节 磁敏元器件的应用	245	三、半导体色敏器件的结构	291
一、霍尔器件的应用	245	四、半导体色敏器件的应用	292
二、磁敏电阻器的应用	248	第三节 离子敏传感器及其材料	293
三、磁敏二极管和磁敏三极管的应用	250	一、离子敏感器件的基本知识	293
本章小结	252	二、ISFET 的结构与工作原理	294
思考题	252	三、离子敏感材料	295
第十一章 力敏器件及其材料	253	四、ISFET 的应用	297
第一节 力敏器件的分类及其工作原理	253	本章小结	298
一、半导体压阻效应	253	思考题	298
二、半导体应变片的特点、种类和 结构	254	第十三章 阻、容、电感元器件及其 材料	299
三、力敏电阻（电阻应变计）	255	第一节 电容器及其材料概述	299
四、压电效应	256	一、各类电容器及其介质材料和特点	299
五、光电式、磁电式位移传感器	257	二、瓷介电容器	301
		三、通用瓷介电容器	303
		四、现代电容器发展的新动态	303

第二节 独石电容器陶瓷材料	304	二、矩形片式电阻器	327
一、低温烧结独石电容器材料	304	三、圆柱形片式电阻器	327
二、中温烧结独石电容器材料	311	四、电阻网络	328
第三节 半导体瓷	312	五、片状微调电位器	328
一、表面层型介电陶瓷	312	第七节 片式电感器	329
二、晶界层型介电陶瓷	312	一、绕线型片式电感器	330
第四节 瓷介电容器的装配	315	二、多层型片式电感器	332
一、电极的制造	315	三、卷绕型片式电感器	334
二、焊接	316	四、薄膜型片式电感器	334
三、防潮保护	317	五、编织型片式电感器	334
第五节 新型瓷介电容器	318	本章小结	335
一、独石型瓷介电容器（片式）	318	思考题	335
二、片式电容器	319	参考文献	336
第六节 片式电阻器	325		
一、概述	325		

第一章 概述

电子材料是指与电子工业有关的、在电子学与微电子学中使用的材料，是制作电子元件和集成电路的物质基础。人类正在进入信息社会；材料、能源和信息技术是当前国际公认的新科技革命的三大支柱。电子材料处于材料科学与工程的最前沿，电子材料的优劣直接影响电子产品质量，与电子工业的经济效益有密切关系。一个国家的电子材料的品种、数量和质量，成了一个衡量该国科学技术、国民经济水平和军事国防力量的主要标志。

第一节 电子材料的分类和特点

所谓电子材料，是以发挥其物理性能（如电、磁、光、声、热）或物理与物理性能之间、力学与物理性能之间、化学与物理性能之间相互转换的特性为主而用于电子信息工业的材料。对照功能材料的定义（凡具有优良的物理性能、化学和生物学功能及其相互转换特性，而被用于非单纯结构目的的材料，即功能材料），不难断定，电子材料属于功能材料的范畴。因此，判别给定材料是否属于电子材料时要注意两个方面，即首先要看其所利用的功能是否指单纯力学、单纯化学和生物学特性以外的功能；此外，还应注意其应用的指向性，即电子信息工业。

另外，根据电子材料在器件中所起的作用，还可将其定义为：凡具有能量与信息的发射、吸收、转换、传输、存储、控制与处理功能特性之一或者是直接参与保障这些功能特性顺利发挥而用于电子信息工业的材料。

电子材料是当前材料科学的一个重要方面，电子材料品种繁多，用途广泛，涉及面宽。它是制作电子元件和集成电路的基础，是获得高性能、高可靠先进电子元件和系统的保证。电子材料除用于制作电子元件与集成电路外，还广泛用于印制电路板和微线板、封装用材料、元件和整机、电信电缆和光纤、各种显示器及显示板，以及各种控制和显示仪表等。

电子材料的种类繁多，其中技术要求较高的，据有关部门统计就达 2000 多种。下面就是根据目前工作中惯用的一些概念进行的分类：①半导体材料；②高纯物质；③混合集成电路用材料；④封装引线材料；⑤电容器材料；⑥电阻材料；⑦光电材料；⑧敏感材料；⑨磁性及记录材料；⑩触点材料；⑪钎焊材料；⑫电子级化学试剂气；⑬电子用工程塑料；⑭电子用树脂；⑮光刻用材料；⑯电子陶瓷材料。

上述列举的电子材料，由于分类标准不一致，相互之间有的仍存在重叠与交叉。这是由于电子材料本身涉及的范围非常广泛，且材料本身兼有多种功能特性，所以，电子材料无论采用哪种分类标准，各类之间存在相互重叠与交叉均是难免的。

电子产品已经渗透到科研、生产、国防和生活的各个方面，品种五花八门，所需的直接材料和配套材料数以万计。电子材料种类繁多，用途广泛，可以从不同的角度对电子材料来进行分类。世界各国和不同的科学家，对电子材料的分类方法不尽相同。

一、电子材料的分类和特点

1. 按电子材料的用途分类

从应用的角度，通常把电子材料分为结构电子材料 and 功能电子材料两大类。能承受一定

压力和重力，并能保持尺寸和大部分力学性质（强度、硬度及韧性等）稳定的一类材料，称为结构电子材料。结构电子材料在电子元器件中用来制作外壳、基片、框架、散热片，以及用于加固和包封等。

功能电子材料是指除强度性能外，还有其特殊功能，或能实现光、电、磁、热、力等不同形式的交互作用和转换的非结构材料。在应用中主要是利用其功能而不是机械力学性能。例如，太阳能电池具有将太阳能（光、热能）转换为电能的功能。一般来说，功能材料对外界环境具有灵敏的反应能力，即对外界的电、磁、光、热、压力、气氛等各种刺激，可以有选择性地作出反应。在电子领域中，通常功能电子材料被加工成一定的形状，配以必要的连接，具有将各种形态的能量互相转换的功能。在电子元器件、集成电路中，就是选用了相应的功能电子材料来工作的。可以认为，没有许多功能材料出现，就不可能有现代电子科学技术的发展。

2. 按组成分类

从化学作用的角度，可以将电子材料分为无机电子材料和有机（高分子材料）电子材料两类。无机材料又可分为金属材料（以金属键结合）和非金属材料（硅等元素半导体、金属的氧化物、碳化物、氮化物等，它们以离子键和共价键结合）。有机电子材料主要是由碳、氢、氧、氮、氧、氟等组成的高分子材料，大部分是以共价键和分子键结合。

3. 按材料的物理性质和应用领域分类

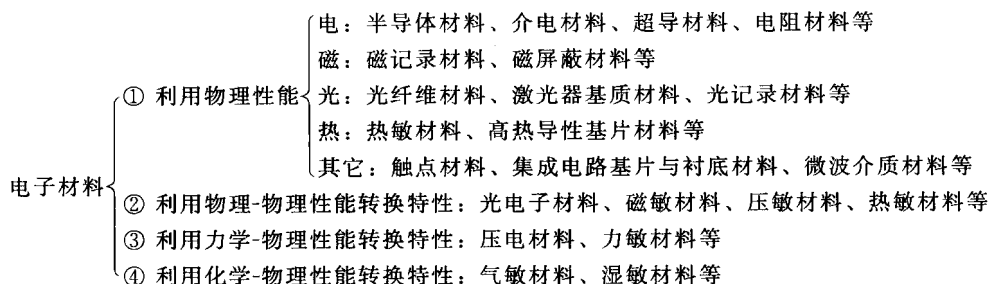
根据材料的物理性质，可将电子材料分为导电材料、超导材料、半导体材料、绝缘材料、压电铁电材料、磁性材料、光电材料和敏感材料等。根据电子材料所制作的元器件和集成电路的应用，又可分为微电子材料（锗、硅、砷化镓等制作半导体器件与集成电路的材料）、电阻器材料、电容器材料、磁性材料、光电子材料、压电材料、电声材料等。

4. 传统电子材料与先进电子材料

将其分为传统电子材料与先进电子材料，是另外一种分类方法。传统电子材料是指已在大量生产，价格一般较低，在工业应用上已有较长期使用的经验和数据。先进电子材料则指具有优异性能的高科技产品，正在进行商业化或研制之中，并具有一定的保密性。

这种划分方法有一定的相对性。先进材料经过解密、商业化、大量生产、广泛应用，并积累了经验之后，就成为了传统材料；也有一些传统电子材料，采用特殊高科技工艺加工后，具有了新的、更优良的性能，就成为了先进电子材料。

此外，还可将电子材料按其所依托的基础功能特性分为四个类别，其中，各个类别的代表性电子材料分别如下。



另外，根据电子材料所应用的具体场合，还可将其分为电真空器件用材料、电阻器和电位器材料、电容器材料、微波器件材料、存储器材料、激光器用材料、光电显示器件材料、光电耦合器件材料、集成电路及混合微电路用材料、传感器用材料和敏感器件用材料等。

由于实际中通常根据所应用材料最主要的功能特性来划分类别,而且某些材料本身具有功能多样性,因此,难免导致有些类别的电子材料之间存在重叠,学习时应注意不要受此框框的限制。值得指出的是,随着材料科学与制备加工技术和电子信息技术的飞速发展,一些新型的电子材料还在不断问世,其特性和应用场合可能会与现有电子材料存在很大差别。所以说,电子材料本身是一个开放的体系,其类别的划分也会随之逐步走向完善。

众所周知,电子信息产业是知识密集型、技术密集型和资金密集型的一类新兴产业。电子信息产业的这些特点,在作为其物质载体的电子材料本身得到明显体现,所以,电子材料的特点可归纳为以下几点。

① 多学科交叉性:电子材料尤其是新型电子材料的出现是多种学科之间相互交叉、互相渗透、彼此融合的结果,它反映了固体物理、固体化学、有机化学、冶金学、陶瓷学和微电子学等多种学科的新成就,这是电子信息产业知识密集的一个主要反映之一。

② 对先进技术的依赖性:电子材料的诞生与发展是与材料制备、加工和检测技术的突破密不可分的。无论是新型电子材料的合成与制造,还是材料及元器件的制备与加工,往往需要利用极端条件或技术作为必要的手段,如超高压、超高温、超高真空、超低温、超高速冷却及超高纯、超精细加工等。以半导体材料及器件为例,每实现一次技术上的突破,如高纯、超高纯晶体提纯技术,高完整性单晶的制备技术,硅外延平面技术和硅固有平面技术等,都会迎来一次半导体材料与器件的飞跃。另外,从对电子材料的测试和分析来看,所要求的技术条件也越来越苛刻,要求精确测量超微量杂质、原子级缺陷、电子迁移以及材料对环境(温度、湿度、气氛、声音及外力等)微小变化的反应。

③ 种类繁多、更新换代快、性能价格比不断改善:电子材料的这一特点是其上述两个特点的必然结果,也是电子材料最直观、最典型的特色。随着各个学科的发展、相互交叉与融合,随着材料制备工艺技术、设备的完善和更新,更多的新型电子材料将不断涌现,性能将不断改善。

二、电子材料对环境的要求

电子材料除了具备电、磁、光、热、压力等特性外,做成元器件和集成电路之后,还应具备一致性和稳定性,能够承受各种恶劣环境。由于电子产品已进入国民经济、国防和民用等各个领域,这就要求电子产品能在不同的环境下性能稳定、工作正常。目前对电子材料的环境要求越来越严格,主要表现在以下几个方面。

1. 温度

电子产品一般要在 $-55\sim+55^{\circ}\text{C}$ 范围内使用,若用于航天装置,低温会延伸到 190°C 或接近热力学温度的零度(-273°C);在汽车电子装置中,工作温度可达 $500\sim 700^{\circ}\text{C}$;在反应堆中,工作温度可高达 700°C ,甚至到 1200°C 。

2. 压力

电子产品一般在一个大气压下工作,但也有处于真空中的,而用于航天设备中真空度约为 10^{-11} Pa 。但在海洋里,水深每增加 10 m 压强增加1个大气压(1个标准大气压 $=101.325\text{ kPa}$),在海洋深处压力可达上千个大气压。由于压力的改变,会引起电子材料耐压强度下降、密封外壳变形和散热效率降低,器件性能劣化等现象。

3. 湿度

温带地区相对湿度(RH)平均为 $65\%\sim 75\%$,沙漠地区则不高于 5% ;而靠近海洋、湖泊的地区,湿度经常可达饱和状态(100%)。测量中发现,在相对湿度为 $65\%\sim 80\%$ 的

空气中，物体上水膜的厚度为 $0.001\sim 0.1\mu\text{m}$ ；而在 100% 的相对湿度下，水膜厚达几十微米，这对电子材料会产生不良影响。水分还会引起一些电子材料（特别是化工材料）尺寸变化，绝缘性能下降，发生击穿和短路等现象。

4. 环境中的化学颗粒及尘埃

工业区的空气中往往含有多种成分的酸、碱、盐等颗粒，这些颗粒能腐蚀电子材料，降低绝缘电阻和击穿电压。海面及沿海地区空气中的盐雾含量一般为 $2\sim 5\text{mm}^3/\text{m}^3$ 。这能在材料的表面覆盖一层导电层，使材料表面的漏电导增加，并能引起材料腐蚀和加速材料的老化。空气中的尘埃含量一般为 $20\sim 60\text{mm}^3/\text{m}^3$ 。沉积在材料表面会使水汽凝结，劣化介电性能。

5. 霉菌和昆虫

在温度 $25\sim 35^\circ\text{C}$ 、相对湿度 RH 超过 70%、缺少日光照射的阴暗地区，霉菌和昆虫容易大量繁殖，造成电子材料介电特性的下降，器件或包封材料的腐蚀和损坏。

6. 辐射

太阳中的紫外线，潮湿条件下的日光照射，都能引起材料的氧化；雷雨时产生的臭氧以及宇宙空间的 γ 、 β 等高能粒子的辐射等，都会使电子材料蜕化、变质或分解。

7. 机械因素

运载环境中的机械因素是指冲击、振动和离心力等。在坦克、舰艇、飞机、火箭、卫星等运载工具上，振动频率的范围为 $10\sim 2000\text{Hz}$ ，有时还可高达 5000Hz 。在一定条件下，电子产品可能会和运载工具发生共振，导致振幅增大 $10\sim 15$ 倍之多，冲击加速度增大到自由落体加速度 g ($1g=9.8\text{m/s}^2$) 的 $100\sim 200$ 倍，甚至达到 500 倍。这些机械的作用将会降低材料的耐疲劳强度和加速元器件老化。

以上的这些环境因素对结构电子材料与功能电子材料来说，都是需要考虑的。为了适应这些要求，对电子材料要有全面认识，要结合材料的成分、工艺条件与材料的结构和性能间的关系进行全方位的研究。

三、电子材料与元器件

1. 电子材料对元器件和集成电路发展的促进作用

在电子设备系统中，元器件与集成电路是其中的关键，为了保证电子设备系统的先进性和高可靠性，高性能和高质量的元器件与电路是必不可少的。而这些高质量、高性能的元器件，必须由优质的电子材料来保证。生产与科研不断向元器件提出更高性能、更高的可靠性等要求，这就成为促使电子材料开发研制的动力。一旦出现某种新型先进的电子材料，就可能使电子元器件迅猛发展，并带来社会的进步。

半导体材料锗、硅和砷化镓的出现，带来的半导体器件、集成电路的迅猛发展，并促使人类进入信息社会，是一个众所周知的例子。

无源元件电阻器的发展也是如此。每当出现一种新的电阻材料，接着就出现一种新型的电阻器。早期的电阻是由炭黑、石墨和树脂混合后压制成的实芯电阻器。这种电阻器耐热性能差、精度不高，满足不了电子设备对大功率和耐高温的要求。因此，当研制出一种耐热和阻值精度方面比实芯电阻高的合金电阻材料后，就出现了线绕电阻器。线绕电阻器虽然在耐热和阻值精度方面比实芯电阻有了明显的提高，但其阻值不能做得很高。于是，又研制阻值范围大、精度高、稳定性好的碳膜和金属膜电阻材料，出现了碳膜和金属膜电阻器。此后，为了进一步提高工作温度，研制出金属氧化膜和硅碳膜电阻材料。为了减轻元件的重量，缩

小尺寸，又研制出一些新型薄膜和厚膜电阻材料，从而开发出集成化薄膜电阻器和片式电阻器。

在电容器、磁性器件、光电器件等方面也有十分类似的情况。

2. 功能电子材料与结构电子材料在电子元器件中的作用

电子元器件中的性能主要由其中的功能材料来决定。但是，有时结构材料对电子元器件性能的影响也很突出。例如用于汽车喷油系统的温度传感器，它在高温、还原性气体、强烈振动等恶劣环境下工作。除电阻体本身要求有良好的高温热敏性能外，封装材料也是决定这类温度传感器的寿命和稳定性的关键因素。

在厚膜浆料和多层布线中的介质浆料中的有机载体，它们起着控制浆料的流变、触变性质，对电路图形和线条宽度、可叠加的层数、电路性能等起着决定性作用。

由此可以看出，在电子元器件和电路中，除了需要考虑功能（敏感）材料的稳定性外，还需考虑封装材料与环境的相互作用，封装材料与功能材料界面间的相互作用，以及热膨胀系数、润湿性的匹配性等方面的问题。

在设计和使用电子材料时，在确定材料成分的同时，还必须充分注意到材料的表面和界面、材料结构与性能、工艺与结构间的关系，这是个系统工程的问题。

第二节 电子元器件的种类及其作用

一、元器件的种类及其作用

1. 电子元件

(1) 电阻器 它是利用金属或非金属材料具有电阻的特性制成的便于安装的电子元件，它在电路中的用途是阻碍电流通过。具体来说，电阻器在电气装置中的作用，大致可以归纳为降低电压、分配电压、限制电路电流、向各种电子元器件提供必要的工作条件（电压或电流）等几种功能。

按其结构可分为固定电阻器和半可调电阻器两大类。

(2) 电位器 它实际上是一个可变电阻器，它用于电路中经常改变电阻的位置，如收录机的容量控制，电视机中的亮度，对比度调节等就是通过电位器来完成的。

(3) 电容器 电容器是家用电器中主要元件之一，和电阻器一样几乎每种电子电路中都离不开它。它具有阻止直流电通过，而允许交流电通过的特点，因此电容器在电路中常用于隔离直流电压、滤除交流信号、信号调谐等方面。

电容器按其结构可分为三大类：固定电容器、可变电容器、微调电容器。按电介质分类有：有机介质电容器、无机介质电容器、电解电容器、液体介质电容器和气体介质电容器等。

(4) 电感元件 电感元件是指电感线圈和各种变压器，是家用电器中的重要元件之一。它和电阻、电容、晶体管等进行恰当的配合构成各种功能的电子电路。电阻、电容、电感一般又统称为无源元件。电子管、晶体管、集成电路等一般统称为有源器件。它又分为高频电感线圈、空心式及磁棒式无线线圈、低频阻流圈。

(5) 变压器 它是家用电器中广泛采用的无源器件之一。利用变压器可以对交流电（或信号）进行电压变换、电流变换或阻抗变换，可以传递信号，隔直流等。它一般由线圈、铁（磁）芯和骨架等几部分组成。

(6) 磁性元件 磁性元件由磁性材料制成。常用来做短波磁性天线、电视机中频变压器

的磁芯等。家用电器中的软磁铁氧体磁性元件有天线磁棒、各种磁芯、磁帽、磁环和磁杯等。

2. 电声元件与继电器

(1) 扬声器 收音机、录音机、电视机等的负载都有一个电声器件——扬声器。它是发声家用电器中必不可少的器件，它的质量好坏，对整个放声系统有着举足轻重的作用。它是一种电声转换器件，能将音频电信号转换成为声波，俗称喇叭。

(2) 传声器 传声器是把声音变成电信号的一种电声器件。它又叫话筒或微音器，俗称麦克风。它的功能是把声能变成电信号。

(3) 开关与继电器 大家对开关是十分熟悉的，我们日常生活里经常用到它。继电器也是一种开关，它通过一定电路实现自动操作，完成比一般开关更为复杂的接通或断开的功能。它可以用小电流去控制大电流或高电压的转接变换。

3. 半导体器件

(1) 晶体二极管 它也叫半导体二极管，它由半导体单晶材料（主要是锗、硅）制成。根据功能它又分为整流二极管、检波二极管、稳压二极管、开关二极管、变容二极管、阻尼二极管、发光二极管。

(2) 晶体三极管 晶体三极管由两个做在一起的 PN 结加上相应的引出电极引线及封装组成。由于三极管具有放大作用，它是电视机、收音机、收录机、电唱机等家用电器中很重要的器件之一。用它可以组成放大、振荡及各种功能的电子电路。

(3) 场效应晶体管 场效应晶体管是受电场控制的半导体器件，而普通晶体管的工作是受电流控制的。场效应管主要有结型场效应晶体管和金属-氧化物-半导体场效应晶体管（通常称 MOS 型）两种类型。

4. 可控硅和单结晶体管

可控硅是可控硅整流器的简称。它是由三个 PN 结的四层结构硅芯片和三个电极组成的半导体器件。它的重要特点是：只要控制极中通以几毫安至几十毫安的电流就可以触发器件导通，器件中就可以通过较大的电流。利用这种特性可用于整流、开关、变频、交直流变换、电机调速、调温、调光及其它自动控制电路中。

单结晶体管有一个 PN 结和两个基极，它的外形与三极管相似，是一种具有负阻特性的器件（电流增加而电压降反而减小的特性）。利用它可组成弛张振荡器、自激多谐振荡器以及定时延时等电路，具有电路结构简单、热稳定性好等优点。

5. 半导体集成电路

半导体集成电路是集成电路中的一大类。集成电路就是把一个电子单元电路或某一功能、一些功能、甚至某一整机的功能电路集中制作在一个晶片或瓷片上，然后封装在一个便于安装焊接的外壳之中。

集成电路有膜集成电路和半导体集成电路之分。半导体集成电路是 20 世纪 60 年代开始发展起来的一种新型电子元器件。它是利用半导体工艺将一些晶体管、电阻、电容以及连线等制作在很小的半导体材料或绝缘基片之上，形成一个完整电路、并封装在特制的外壳之中。由于半导体集成电路具有体积小、重量轻、可靠性高以及成本低廉等一系列优点，它不仅在尖端科技产品中利用，在家用电器中也到处可以找到它的踪迹。

半导体集成电路人们习惯上称“集成块”，常用英文字母缩写“IC”表示。按照电路功能分类有：数字集成电路、模拟集成电路（集成运算放大器、集成稳压器、模拟乘法器、特种放大器、功率放大器、电压频率转换器、频率电压转换）、微波集成电路三类。

6. 特殊半导体器件

(1) 热敏半导体器件

a. 热敏电阻器 热敏电阻器是用对温度敏感的半导体材料制成的。它的阻值随温度变化有比较明显的改变。温度升高电阻值增大,称为正温度系数(PTC);温度升高而电阻值减小称为负温度系数(NTC)。它们广泛应用于恒温发热、限流、温度传感器、测温、控温、温度异常报警等。

b. PN结温度传感器 它是利用半导体PN结的正向压降随温度变化而变化的特性制成的感温元件,也叫半导体热敏二极管。用它可以做成温度计,用来测量小范围及小热容量物体的温度。

(2) 光敏半导体器件 光敏器件是将光能转变为电信号的半导体传感器件。常用的光敏器件有光敏电阻、光敏二极管、光敏三极管等。

光敏电阻是利用半导体材料(硫化镉、硫化铋等)的光电效应制成的电阻,又称光导管。如硫化镉光敏电阻在无光照射时的暗电阻可达 $1.5\text{M}\Omega$,在有光照射时,则电阻大大减小,可小至 1000Ω ,两者之比为1500倍。

(3) 力敏半导体器件 力敏半导体器件是利用晶体在受到应力作用时会产生形变,其电阻率也会随之发生变化的原理制成的压力传感器。

力敏半导体器件分为扩散电阻型压力传感器、硅杯形压力传感器、压电压力传感器。

(4) 磁敏半导体器件 常用磁敏器件有磁敏电阻和磁敏二极管,它们的导电特性会随磁场强度不同而变化。

a. 磁敏电阻 它是利用铽化铟单晶材料制成的。它的特点是在弱磁场中电阻值与磁场的关系呈平方律关系,在强磁场中则呈线性关系。它具有较高的灵敏度,可以做成各种无触点开关或无接触电位器。

b. 磁敏二极管 目前已制成硅平面磁敏二极管以及磁敏三极管。已经用于自动控制中。

(5) 气敏半导体器件 气敏器件是利用半导体材料二氧化锡(SnO_2)对气体的吸附作用,从而改变其电阻值的特性制成的,利用它能及时检测有毒气体和可燃性气体的溢出及泄漏,通过一定的电子装置进行报警。

(6) 压敏半导体器件 用半导体材料锗、硅、ZnO系、SiC系压敏陶瓷做成的压敏电阻是一种对电压敏感的器件,在一定温度下和某一特定的电压范围内,压敏电阻的电流随电压的增加而急剧增大。

半导体压敏电阻广泛用于对浪涌电压的保护、继电器(或电感、变压器)等过电压保护以及半导体器件的保护。

7. 电真空器件

电真空器件的诞生给电子技术带来了兴盛和繁荣。它包括电子管、显像管、磁控管等。

8. 压电器件

① 压电超声器件及装置: 超声检测探头、超声波探伤仪、压电超声乳化装置等。

② 压电声表面波器件。

③ 压电水声器件。

④ 压电电声器件: 压电扬声器、压电耳机、压电传声器、压电拾音器等。

⑤ 压电滤波器、鉴频器。

⑥ 压电发电机、电动机和变压器。

⑦ 压电致动元件: 压电双晶片喷墨打印机、压电振动风扇、压电陶瓷继电器、压电开

关等。

⑧ 压电超声诊断和治疗器件及装置：压电超声诊断探头（如B超探头）、超声显微镜等。

⑨ 复合压电振子：压电马达、压电蜂鸣器。

⑩ 微位移器：压电陶瓷位移发生器、压电流量阀等。

⑪ 微波介质滤波器（谐振器）。

二、分立电子元器件及其应用

分立电子元器件主要包括有电容器、电阻器及电感器，它们在电子设备中起着非常重要的作用，下面对其功能分别作简单的介绍。

1. 电容器

电容器是由介质隔开的两块金属极板构成的电子元件，它是电子设备中主要基础元件之一，广泛用作储能和传递信息。

在电子工程中它用于发送接收设备、电视、计算机、电子仪器、电工测量仪器和自动装置中；在电力工程中用于改善系统功率因数、防止过电压、获得瞬时大电流、电机启动、灭弧，同时还广泛用于高频加热、高频淬火、发动机点火、家用电器、闪光摄影等方面。

电容器在上述领域的应用可按其在电路中完成的功能区分如下。

（1）隔直流 电容器有效地阻止直流而限制低频交流，对高频电流没有多大影响，常用来使电路某一部分不出现直流电压。

（2）旁路（去耦） 电容器为交流电路中某些与之并联的元件提供低阻抗通路，此类电容器要求有低的损耗因数和电感。

（3）耦合 电容器用于电路的级间连接，允许交流信号通过并传输到下一级电路而阻止直流通过。

（4）滤波 电容器与电感线圈或电阻器按一定方式连接，可以有选择性地传输不同频率。此类电容器要求有高的频率稳定性和低的损耗因数。

（5）温度补偿 电容器用于对其它元件进行温度补偿，从而改善电路的稳定性。此种电容器的容量温度系数可按标准系列选取。

（6）计时 电容器与电阻器配合使用可确定电路的时间常数。

（7）调谐 电容器用于与频率有关的电路或系统的调谐。此种电容器必须有低功率因数（高Q）和长期的稳定。

（8）整流（半导体可控整流电路） 电容器利用存储的能量，在预定的时间关闭半导体开关元件。

（9）储能 电容器利用一较小功率的电源长时间充电，然后在很短时间内放电，可得到很大的冲击功率。一般用于焊接、闪光灯（电容器）、加热等装置中。

（10）微调 通过一支小的可变电容器与一支大容量电容器结合来调整总容量。

（11）差动 可变电容器有彼此绝缘的两组定片和一组公共动片。旋转动片时，其中一组容量增大，而另一组容量减小。此种电容器用于可变电容分压器、电容电桥、天线耦合等场合。

随着电子工业的飞速发展，人们对电容器提出了更加严格的要求，概括起来就成为电容器的发展方向。

（1）高可靠性 为了保证电子设备能正常工作，必须保证元器件具有高的可靠性。