

本书介绍了热敏电阻器的基本知识、结构原理、特性分析、设计计算及它的稳定性、互换性和线性化问题，对它的制备工艺、测试方法和在仪器仪表中的应用也作了相应的阐述。

本书可供从事仪器仪表工作的工程技术人员和高等院校半导体器件专业的师生阅读，也兼顾到有关工人、管理干部的要求。

仪表元件丛书  
热敏电阻器  
徐开先 叶济民 编

\*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本  $787 \times 1092 \frac{1}{32}$  · 印张  $5 \frac{3}{8}$  · 字数 115 千字  
1981年8月北京第一版·1981年8月北京第一次印刷

印数 0,001—7,000 · 定价 0.51 元

\*

统一书号: 15033 · 4984

## 出版者的话

仪器仪表是实现四个现代化必不可少的技术装备，而仪器仪表元件（简称仪表元件）是仪器仪表中具有独立功能的最基本的单元，它是仪器仪表的基础，它能完成信号的检测、传递、转换、放大、贮存、运算、控制和显示等功能。仪表元件的品种和质量直接影响着仪器仪表的性能。

目前，仪器仪表已广泛应用于国民经济各部门。为了适应仪器仪表工业发展的需要，进一步做好仪表元件基础知识的普及工作，在国家仪器仪表工业总局的直接关怀下，我们编辑出版了这套《仪表元件丛书》。

本丛书预定为十一分册，分别为《热敏电阻器》、《集成电路在仪器仪表中的应用》、《半导体光电器件》、《宝石支承》、《仪表齿轮》、《金刚石压头》、《数据采集系统中的放大器》、《磁电转换元件》、《自动平衡仪表放大器》、《自动平衡仪表电机》、《集成运算放大器》等，将陆续出版。

本丛书以介绍各类仪表元件的结构原理、特性、设计计算为主，对制造工艺、性能测试、应用知识也作了简单的阐述。在写法上，力求通俗易懂，深入浅出，从基础概念出发，对仪表元件的有关问题进行论述。

值此《仪表元件丛书》出版之际，我们向为丛书的编写做了大量组织、指导工作的沈阳仪器仪表研究所的领导及从事具体工作的王崇光、董世章等同志表示深切的谢意，并向大力支持丛书编写的各有关单位领导及编者，表示衷心的感谢。

# 目 录

出版者的话

第一章 绪论	1
第一节 热敏电阻器的定义、分类和特点	1
第二节 热敏电阻器的发展简史和展望	4
第二章 热敏电阻器的基本知识	9
第一节 热敏电阻器的导电机理	9
一、本征半导体的导电机理	9
二、杂质半导体的导电机理	12
三、热敏电阻器的电阻与温度的关系式	13
第二节 热敏电阻器的基本参数和主要特性曲线	15
一、热敏电阻器的基本参数	15
二、热敏电阻器的主要特性曲线	20
第三节 热敏电阻器的构造与材料	21
一、构造	21
二、热敏电阻器的材料	23
第四节 热敏电阻器的制备工艺	26
一、以金属氧化物为材料的片形、杆形热敏电阻器的制备	26
二、以金属氧化物为材料的珠形热敏电阻器的制备	30
三、常用锗单晶、硅单晶、碳化硅单晶、硼单晶热敏电阻器的制备	31
四、薄膜热敏电阻器的制备工艺	34
第三章 热敏电阻器的特性分析	39
第一节 热敏电阻器的电阻-温度特性	39
一、负电阻温度系数的热敏电阻器的电阻-温度特性	39
二、正电阻温度系数热敏电阻器的电阻-温度特性	47
第二节 热敏电阻器的伏-安特性	49
一、负温度系数热敏电阻器的伏-安特性	49

---

## VI

二、正温度系数热敏电阻器的伏-安特性	58
第三节 热敏电阻器的时间常数	59
第四节 热敏电阻器的耗散系数	66
一、耗散系数的定义	66
二、影响耗散系数的因素	67
第五节 热敏电阻器的老练特性	71
一、热敏电阻器的老练	71
二、影响老练的因素	71
第四章 热敏电阻器基本参数的测试	74
第一节 电阻值 $R_T$ 的测定	74
第二节 电阻-温度曲线的绘制和 $B_n$ 、 $\alpha_{tn}$ 的计算	80
一、电阻-温度曲线的绘制	80
二、 $B_n$ 、 $\alpha_{tn}$ 的计算	82
第三节 伏-安特性的测试	83
一、一般测试方法	83
二、恒流定点法测定 $U-I$ 特性曲线	84
第四节 时间常数 $\tau$ 的测试	85
第五节 耗散系数 $H$ 的测定	88
一、图解法	88
二、算法	89
第五章 热敏电阻器的稳定性、互换性及电阻-温度特性的线性化	90
第一节 热敏电阻器的稳定性	90
一、稳定性	90
二、影响稳定性的因素	91
三、提高稳定性的措施	96
第二节 热敏电阻器的互换性	97
一、互换性问题的提出	97
二、解决互换性的途径	97
第三节 热敏电阻器电阻-温度特性的线性化	108
一、线性化问题的提出	108
二、实现线性化的步骤	108

第六章 热敏电阻器的应用 .....	122
第一节 热敏电阻器的工作点与伏-安特性的关系 .....	122
第二节 热敏电阻器在温度测量方面的应用 .....	125
一、简介 .....	125
二、测温用热敏电阻器的一般要求 .....	126
三、测温用热敏电阻器的探头结构 .....	126
四、测温用热敏电阻器的安置方法 .....	127
五、自热式热敏电阻器测温电桥的设计方法 .....	128
六、自热电桥的设计举例 .....	134
第三节 热敏电阻器在温度补偿方面的应用 .....	136
一、概述 .....	136
二、热敏电阻器型号的确定 .....	136
第四节 热敏电阻器在流量测量方面的应用 .....	140
一、四种基本方法 .....	140
二、利用耗散原理来测流量 .....	141
三、旋进型漩涡流量计 .....	143
四、三角柱流量计 .....	146
第五节 正温度系数热敏电阻器的应用 .....	147
一、用于温度探测 .....	148
二、在温度测量方面的应用 .....	149
三、用于各类家庭电热器具 .....	149
附录 .....	152
一、热敏电阻器型号命名方法 .....	152
二、常用国产半导体热敏电阻器的型号和规格 .....	155
三、热敏电阻器测温桥路的计算公式 .....	160
主要参考文献 .....	163

# 第一章 绪 论

## 第一节 热敏电阻器的定义、分类和特点

热敏电阻器是一种敏感元件，其特点是电阻值随温度的变化而显著变化，因而能直接将温度的变化转换为电量的变化。热敏电阻器一般是用半导体材料制成的，温度系数大约从  $(-0.3 \sim +60) \%/^{\circ}\text{C}$ 。

热敏电阻器的分类尚无统一标准，也很难找到一种完善的分类方法。一般来说，可依其电阻-温度特性、结构、形状、用途、材料、使用温度范围等分别进行分类〔1〕〔2〕〔3〕。

按热敏电阻器的电阻-温度特性分类：

负温度系数热敏电阻器（简称 NTC），是在工作温度范围内，电阻值随温度的增加而减小的器件，其电阻-温度特性曲线如图 1-1 曲线 1 所示。电阻温度系数通常在  $-(1 \sim 6) \%/^{\circ}\text{C}$  范围内。

临界负温热敏电阻

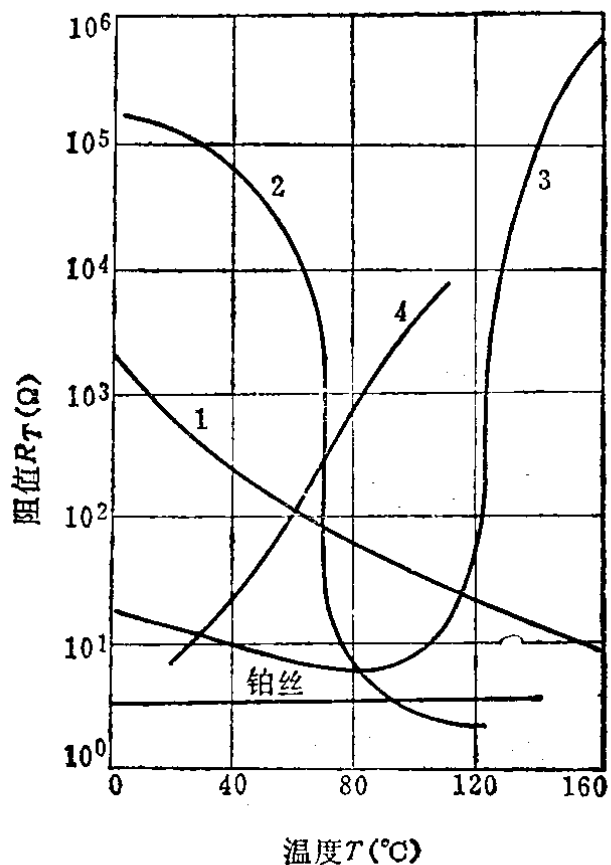


图1-1 几种不同类型热敏电阻器的电阻-温度特性曲线

器（简称 CTR），其电阻-温度特性如图 1-1 曲线 2 所示。这种热敏电阻器电阻温度系数虽然也是负的，但存在一临界温度，超过临界温度后，阻值急剧下降。

正温度系数热敏电阻器（简称 PTC），按其电阻-温度特性的不同又可分为两种类型：开关型正温度系数热敏电阻器（或称临界正温热敏电阻器）和缓变型（补偿型）正温度系数热敏电阻器。前者的电阻-温度特性如图 1-1 曲线 3 所示。当在居里点温度以下，热敏电阻器的电阻值大体不变，当达到居里点温度时，阻值急剧增大，电阻温度系数可达  $(10\sim 60)\%/^{\circ}\text{C}$ 。缓变型正温度系数热敏电阻器电阻-温度特性如图 1-1 曲线 4 所示，它与开关型相似，但在居里点温度附近的变化不像开关型那样陡峭，电阻值的对数同温度的关系，在  $-20\sim +80^{\circ}\text{C}$  之间，大体上呈一直线变化，电阻温度系数在  $(0.5\sim 8)\%/^{\circ}\text{C}$  之间。

按热敏电阻器的结构形状分类：

可分为片形（包括垫圈形）、杆形（包括管形）、珠形、线形、薄膜型等。

按结构还可以从有无外加热源分为直热式和旁热式两种：

直热式是由电阻体本身通过电流来取得热源的。

旁热式是有外加热源的。在管形热敏电阻器中央或在珠形热敏电阻器外部，加上加热器就可以做成旁热式热敏电阻器。

此外，还可以按有无密封分为非密封型与密封型两类。

按制造热敏电阻器的材料分类：

可分为陶瓷热敏电阻器、半导体单晶热敏电阻器、玻璃态热敏电阻器、塑料热敏电阻器、金刚石热敏电阻器等。其

中陶瓷热敏电阻器是最常见也是产量最多的，它是利用各种氧化物在不同的条件下烧成半导体陶瓷，以获得热敏特性而制成的。

按特性分类：

利用其各种特性制成不同器件。例如，利用其电阻-温度特性制成测温器、控温器等；利用其非线性伏-安特性，制成功率计、稳压器等；利用其耗散系数随所处介质及状态不同而变化的特性，制成气压计、气体分析计等。

按工作温度范围分类：

可分为：常温热敏电阻器，其工作温度范围  $-55\sim 315^{\circ}\text{C}$ ，是一种在正常气候条件下没有特殊技术要求和结构要求的热敏电阻器；低温热敏电阻器，其工作温度范围小于  $-55^{\circ}\text{C}$  ( $218^{\circ}\text{K}$ )；高温热敏电阻器，其工作温度范围大于  $315^{\circ}\text{C}$ 。

热敏电阻器的特点：

灵敏度较高 热敏电阻器的阻值对温度变化的灵敏性强，通常温度变化  $1^{\circ}\text{C}$ ，阻值能变化  $-(1\sim 6)\%$ ，电阻温度系数的绝对值要比金属大  $10\sim 100$  倍，其温度灵敏度要比铜电阻、铂电阻、热电偶等其它感温元件高得多，因此，即使和很粗糙的二次仪表组合，也能检测出  $0.1\times 10^{-5}^{\circ}\text{C}$  的温度变化〔4〕。

稳定性较好 近年来，由于对热敏电阻器稳定性理论的研究有新的突破，并采用了一些高稳定性材料，因此热敏电阻器的稳定性有了很大提高。据文献〔4〕报导，在  $0.01^{\circ}\text{C}$  的小温差范围内，稳定性可以达到  $0.0002^{\circ}\text{C}$  的精度。在短期内，阻值的稳定度可达到  $0.0001^{\circ}\text{C}$  的温度精度。因此热敏电阻器被广泛用于精密测温 and 控温电路中。但总的来说热敏电阻器的稳定性问题尚未彻底解决。



体积较小 根据不同的使用条件和对象，它可以制成各种形状、大小和规格。珠形热敏电阻器探头的最小尺寸达0.2毫米，能用于热电偶及其它温度计无法测量的空隙、腔体、内孔、生体血管、轴和轴承间过热等的测量。

易于实现远距离测量和控制 由于热敏电阻器的阻值可以从 $10^2 \sim 10^5$ 欧之间任意挑选，不像热电偶那样要求冷端补偿，也不需考虑线路的引线电阻和接线方式问题，加之它的过载能力强、功率损耗小、工作温度范围广、热容量又可以做得很小，因此在需要远距离测温 and 控温的场合，往往选用热敏电阻器作为一次测温元件。

由于热敏电阻器具有上述特点，加之它的制作简单、寿命长、易于维护，因此越来越引起人们的重视并获得广泛应用。

## 第二节 热敏电阻器的发展简史和展望

世界上第一只半导体热敏电阻器是在三十年代末出现的。早在1837年前，人们就发现硫化银等一些半导体材料具有很大的负电阻温度系数，但由于当时工业水平的限制，在很长一段时间内，这些发现没有得到实际应用。到1930年以后，人们开始用硫化银、氧化铜、氧化铈等半导体材料做成热敏电阻器，但由于材料和工艺都未过关，造成元件质量不稳定，因而仅能作为补偿元件而不能作为测量元件在电子线路中应用。1940年以后，发现将某些过渡金属氧化物按一定比例混合，经过成形、烧结以后，便能获得具有很大负电阻温度系数的半导体。用这种材料制成的热敏电阻器，性能稳定，可以在空气中直接使用。从1946年以后，各国生产的负电阻温度系数热敏电阻器，绝大多数是用这一类氧化物半导

体材料制成的，它们的电阻温度系数通常在  $-(1\sim 6)\%/^{\circ}\text{C}$  范围内。

五十年代末到六十年代初，是热敏电阻器发展的全盛时期。在这段时期内，先后研制和投产的热敏电阻器有：玻璃态热敏电阻器（以氧化钒为主体）、硅、锗单晶热敏电阻器（锗单晶热敏电阻器用于超低温测量）、临界温度热敏电阻器（用  $\text{V}_2\text{O}_5$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{BaO}$ 、 $\text{SrO}$ 、 $\text{CaO}$  等氧化物混合烧结而成）以及以钛酸钡材料为主晶的正温度系数热敏电阻器。

近年来，随着硅元件平面工艺的成熟和集成技术的不断发展，又出现了采用相应工艺的负温度系数热敏电阻器和薄膜热敏电阻器，如碳化硅单晶热敏电阻器、硼单晶热敏电阻器、碳化硅薄膜热敏电阻器〔8〕、〔9〕。

我国自1956年开始研制和生产热敏电阻器，并首先在通讯设备中应用。1964年后，由于晶体管电路的普遍采用，热敏电阻器作为电路的温度补偿元件而被广泛利用。近些年来，随着科学技术和国防的发展，它的应用领域也日渐扩大。

热敏电阻器既是重要的传感元件之一，又是国民经济中不可缺少的电子元件，因此各国对热敏电阻器的研究和发展都很重视。工业先进的国家，不仅设有现代化的研究试验基地，还设有新产品试制车间和技术咨询机构，以解决元件在工业、民用和军用方面的特殊要求。热敏电阻器的发展也与新理论、新材料、新工艺的发展密切相关。热敏电阻器的优劣，还直接影响到与其配套的二次仪表的选择和品质。目前，国内外热敏电阻器的发展趋势主要有以下几方面：

1. 探索新原理，采用新技术，研制新器件。

正温度系数热敏电阻器和临界温度热敏电阻器虽已研制成功并得到某些应用，但对它们的工作原理、制备和进一步应用，尚待深入研究，使之完善。

目前还正在探索一种多功能组件，即在同一基片上，既有检测热敏元件又有补偿热敏元件，或将两个热敏元件做成“差动式”，以获得更高的灵敏度；还可将热敏电阻器和其他传感元件制作在同一电路中，以实现传感元件的一体化。

据报导，一种电阻温度系数  $\alpha$  和温度  $T$  无关的新器件的研制已获得成功〔1〕，并正在研究和设法改变热敏电阻器  $R_T-T$  曲线的非线性，以保证热敏电阻器在所需的工作温区有线性  $R_T-T$  特性，这对解决热敏电阻器线性化问题将是一个根本的“变革”。

必须研究热敏电阻器的新制备技术，因为新的制备技术对热敏电阻器的性能有很大影响。如采用  $RF$ （射频）溅射和  $DC$ （直流）溅射所制成的薄膜热敏电阻器，薄膜成分均匀，阻值易控制，特性稳定，时间常数可达12微秒。利用浸渍—外延技术制备的  $6H-SiC$  薄膜热敏电阻器也有良好的电学特性〔10〕。

## 2. 寻求性能稳定、灵敏度高、工艺性好的热敏材料。

稳定性不够理想、互换性较差，是当前热敏电阻器存在的较大缺点，这使热敏电阻器的应用受到限制。目前生产的热敏电阻器大部分是用氧化物材料制成的，国内外对其稳定性和互换性进行了大量研究工作。用于温度测量的热敏电阻器，已有较高的稳定性和较好的互换性，目前，使用温度已达  $300^{\circ}\text{C}$ ，阻值年稳定性可达  $0.05\%$ 。但氧化物热敏电阻器在高温下长期使用时，稳定性较差，电学性能也会发生改变，所以各国都在寻求高稳定性的热敏材料。

当前趋向于用单晶热敏材料和稀有元素热敏材料来弥补氧化物材料的某些不足。目前已找到的这类材料有硅单晶、硼单晶、碳化硅单晶等，品种不多。

1960年以后，出现了一种工艺性能良好的玻璃态热敏电阻器和塑料热敏电阻器〔10〕。

玻璃态热敏电阻器是以  $V_2O_5$ 、 $WO_3$  等氧化物为主要成分，加入  $P_2O_5$  等酸性氧化物作为熔剂做成的热敏电阻器，其工艺性虽然很好，但玻璃态热敏电阻材料有水解性，因而稳定性较差。

塑料热敏电阻器是一种具有负阻特性的高分子热敏电阻器，其特点是有良好的可绕性、加工性和成型性，易于高效生产。这种热敏电阻器是将聚乙烯掺入热敏有机半导体中制成的。它具有半导体的电子特性和塑料的机械特性，并且灵敏度高。用塑料热敏电阻器制成的传感器，其灵敏度比用氧化物热敏电阻器制成的传感器要高一倍。但这种热敏电阻器的使用温度不高，从目前报导资料来看，大约为  $120^\circ\text{C}$  左右，因此必须进一步研究提高这种元件的使用温度。

### 3. 积极发展超低温和高温测量用热敏电阻器。

七十年代初，各国对  $-200^\circ\text{C}$  以下热敏电阻器进行了研究，但至今工艺尚未过关。用于低温的热敏电阻器，要求  $B_n$  值小，电阻率低。例如从室温到液氮温度，阻值变化从 10 欧到 30 千欧， $B_n$  值变化应在  $1000\sim 1300^\circ\text{K}$  之间，如测到液氢 ( $-250^\circ\text{C}$ )，则材料常数应更小，约等于  $200\sim 250^\circ\text{K}$ 。目前要找出  $B_n$  值为  $1500^\circ\text{K}$  或更低的材料，估计需用单晶半导体掺杂才能达到。

研制稳定的高温用热敏电阻器也是方向之一，并且工作温度越高，研究的难度也越大。高温热敏电阻器的研究必须

解决：耐高温热敏材料、电阻器的高温灵敏度、欧姆接触材料及工艺、引线材料和引线连接方式、高温保护管等一系列问题。另外还需注意高温热敏电阻器的稳定性、响应时间、耗散系数等电参数[12]。

4. 充实通用热敏电阻器的品种系列、扩大热敏电阻器的应用领域。

以往的热敏电阻器，大部分是为配合电子线路的需要而研制的，而对测量仪器用的热敏电阻器则考虑较少，虽然也研制出了一些测量用热敏电阻器，但品种和质量都不能满足要求。因此，目前迫切需要发展和充实测量用热敏电阻器的品种和系列，如发展测点温用的热敏电阻器、测流速、流量、液面高度、真空度、分子量等用的热敏电阻器，发展精密温度补偿用热敏电阻器，以及特殊场合用的热敏电阻器。

## 第二章 热敏电阻器的基本知识

### 第一节 热敏电阻器的导电机理

热敏电阻器是由半导体材料制成的，其电阻值和温度特性，主要取决于半导体材料的特性。为了了解热敏电阻器的导电机理，就必须对半导体的导电机理作必要的了解。

#### 一、本征半导体的导电机理

半导体和其他固体一样，是由紧紧相挨着的原子周期地重复排列而成的。这种周期性的原子排列，常称为晶格（晶体）。晶体中的电子状态和原子中的有所不同，特别是原子的外层电子有了显著的变化；同时晶体中的电子又保留着不少原来它们在原子中的特征。在原子中，电子分布在内外许多层轨道上，每层轨道对应于确定的能量。当原子和原子相互接近而形成晶体时，原子中的电子不仅受到所属原子的束缚力的作用，而且受到相邻原子的原子核和电子的作用。因而相邻原子的内外各层轨道都有不同程度的交叠，而且愈相邻近，外层电子的轨道重叠就愈多。由于电子轨道间的重叠，在晶体中，电子显然不会再完全局限于一定的原子，而可以由一个原子转移到相邻的原子上去。这样，电子将可在整个晶体中运动。电子的这一重要特性称为电子共有化运动。所以晶体中的电子兼有原子运动和共有化运动。在热激发的作用下，这些电子就可以脱离所属原子的束缚而参加导电〔14〕。

由于能量状态的改变，当 $N$ 个原子中具有相同能量的电子能级组成一个系统时，由于原子间的相互影响，它们转化

成  $N$  个共有化运动状态的能量，就不再是相等而分裂成  $N$  个能级。一般  $N = 10^{23}/\text{厘米}$  的数量级，所以能级之间间隔很近，可以看作是一个由连续能级组成的能带，如图2-1。

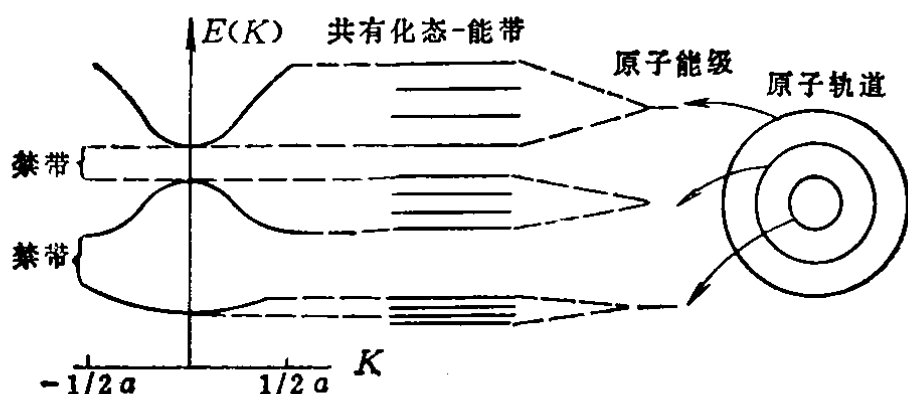


图2-1 能带和原子能级之间的对应关系

能带的宽窄与组成晶体的原子性质及电子排列的情况有关，而与晶体包含的原子数  $N$  无关。 $N$  增加，能带中共有化能级数目增加，它们的密集程度也增加。每个带上有  $N$  个能级，最多可容纳  $2N$  个电子。

电子在能带中占有的程度不一样，则引出了导带、满带和禁带的概念。允许电子存在的能带是允许带。允许带又可分为满带和导带，被电子填满的能带叫满带（即填满  $2N$  个电子）。没有被电子填满的能带叫做导带（即小于  $2N$  个电子）。满带在加外场和不加外场下电流均为零，即满带中的电子不导电。导带在不加外场时电流为零，在外场作用下电流不为零，所以只有导带导电。不允许电子存在的能带叫禁带。

根据导电程度，一般在工程上又把固体分为导体、半导体、绝缘体三类。

1. 导体：如铜、银、金、铝等，电阻率为  $10^{-4} \sim 10^{-6}$  欧姆·厘米。

2. 半导体: 如锗、硅、砷化镓、碳化硅等, 其电阻率为  $10^{-2} \sim 10^{10}$  欧姆·厘米。

3. 绝缘体: 如橡皮、塑料、木材等, 其电阻率为  $10^{14} \sim 10^{22}$  欧姆·厘米。

这种划分方法是不科学的, 而能带理论就成功的阐明了为什么有些晶体是导体, 有些晶体是绝缘体或半导体。

能带理论认为: 导体和绝缘体的区别主要视电子是在导带还是在满带。对绝缘体而言, 其禁带 ( $E_g$ ) 比较宽, 一般在  $3 \sim 4$  电子伏以上, 导带中没有电子 (除非电场非常强), 因此在外场作用下不会产生电流。

金属没有禁带, 而是导带中存有大量的空能级, 外加电场时, 电子有极大的机会在电场的作用下占有新能级使总状态改变, 而使晶体中的电子沿电场方向移动产生电流, 所以金属电导率很高, 是良好的导体。当温度升高时, 金属中参加导电的电子数目不变, 而只有晶格振动加强, 使电导率下降, 所以金属材料具有小的正电阻温度系数。

至于半导体, 从能带结构上看来, 基本和绝缘体相似, 只是禁带比较窄, 一般在  $0.5 \sim 3$  电子伏。因此可以依靠热激发, 把满带中的电子激发到导带上去, 在导带中的电子就有导电作用。当温度增加时, 电子被激发, 载流子数目增加很快, 电导率可以增加几个数量级, 所以半导体材料具有很大的负电阻温度系数。

上面的分析前提是假定晶体是高度纯净和完整无缺的。电子从满带被激发到导带而具有的半导体性质的物质, 一般称本征半导体。在一般情况下, 大多数半导体的性质同杂质的种类和含量有关, 这种半导体称为杂质半导体。

下面分析杂质半导体和缺陷对半导体材料导电性能的影响



响。

## 二、杂质半导体的导电机理

在高纯完整的半导体材料中，其能带如图2-2 a)所示，电导率决定于禁带宽度  $E_g$ 。当在高纯半导体材料中加入高价



图2-2 本征半导体和杂质半导体的能级图

a) 本征半导体    b) 施主杂质半导体(n型)    c) 受主杂质半导体(p型)

杂质时，由于杂质原子进入晶格位置后产生多余的价电子，它因受原子束缚力比较小而容易游离，因此处于较高的能量状态，一般在导带底附近产生附加能级  $\Delta E$ ，如图2-2 b)所示，这种杂质称施主杂质。 $\Delta E$  称为施主能级（或激活能）。含有施主杂质的半导体称 n 型半导体。由于  $\Delta E$  甚小于  $E_g$ ，使电子脱离杂质原子束缚所需的能量远小于将电子从满带激发到导带所需的能量，因此当温度不太高时导带的电子主要来自杂质。同理，当在半导体材料中加入低价杂质时，杂质原子进入晶格位置后，由于价电子不足，同样会在满带顶附近产生附加能级  $\Delta E_1$ ，如图2-2 c)所示。这种杂质称受主杂质， $\Delta E_1$  称为受主能级（或激活能），含有受主杂质的半导体称 p 型半导体。由于受主能级  $\Delta E_1$  的出现，在外电场作用下，满带中的电子可以被激发进入受主能级，而在满带中出现空穴，空穴的作用相当于带正电荷的载流子，也可以产生电导。

由于杂质附加能级的作用，特别是在低温范围内，当热激发还不足以使半导体引起本征激发时，杂质激发可以使载