

固体的结构和性质丛书

金属和合金的电学性质

〔英〕J. S. Dugdale 著

朱道康 吕世骥 译

陆 栋 校

5

高等教育出版社

固体的结构和性质丛书

金属和合金的电学性质

〔英〕J. S. Dugdale 著

朱道康 吕世骥译

陆 栋 校

高等教育出版社

内 容 提 要

本书是英国Edward Arnold (Publishers) Ltd.出版的固体的结构和性质丛书中的第五本。书中阐明了金属和合金与电子输运有关的一些简单性质,在叙述中比较注意说明过程的物理本质,内容包括:体输运性质,输运性质的简单描述,固体中的电子,场对电子运动的影响,半导体中的电子和空穴,输运系数,散射问题,过渡金属和浓合金的电阻率等。

本书可作为我国高等学校固体物理学、材料科学等方面有关课程的教学用书,也可供有关专业的大学生、研究生、教师和科技人员参考。

The Structures and Properties of Solids 5
The Electrical Properties of Metals and Alloys

by

J.S.Dugdale

Edward Arnold (Publishers) Limited (1977)

固体的结构和性质丛书

金属和合金的电学性质

[英] J.S.Dugdale 著

朱道康 吕世骥译

陆 栋 校

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

开本850×1168 1/32 印张10.375 字数250 000

1988年11月第1版 1988年11月第1次印刷

印数00 001—1 350

ISBN 7-04-000704-5/O·87

定价 2.65 元

主 编 序

固体的电导率及其对温度和成份的依赖性，向固体理论提出了首要的课题，这也将继续成为研究固体和固体电子学应用的广大科学家所关注的中心问题之一。没有其它特性在量级上呈现如此宽广的变化(在4开下，高纯铜的电导率为金刚石的 10^{25} 倍)，本丛书论及的金属固体的每个特点——能带结构、晶体缺陷的发生、晶格振动及磁有序的开始等等——都对电导率有影响。

显然，要在本书这样的篇幅内详细论述所有这些专题是不可能的(阐述这些专题需要的篇幅显然要比丛书中其它专题需要的更长)。在较详细地研究引起散射的各种扰动之前，Dugdale教授对固体载流状态的图象和有关的电子能态这两方面重要的概念给予了仔细的述评。他对实际材料性能的关心，使他能够为读者提供一些非常重要的论题的物理了解，在比较正规的教材中，这往往被忽略了。在后面部分，他论述了过渡金属的输运性质，和稀磁合金^①中的电阻及温差电的反常现象(近藤(Kondo)效应)，不同散射机制之间的相互作用(对马德森(Matthiessen)定则的偏离)并对浓合金和化合物的输运性质作了适当的描述。

本书基本上是自成一体的(假定有量子力学的某些基础)。但是，在电子能带模型这一方面，或者在金属中作为散射体的缺陷的作用及离子晶体中载流子作用的另一方面，读者想知道更详细的内容，可参阅Coles和Caplin著的《固体电子结构》和Henderson著的《晶体缺陷》。

B. R. C.

1976年于伦敦帝国学院

^①指溶入少量具有定域磁矩的杂质形成的合金，详见本书9.3.1节。——译者注

序 言

在本书中，我力求说明金属和合金的与电子输运有关的一些简单性质。在论述这些问题时，凡是可能的地方，我都试图阐明过程的物理本质，并作出初步的，希望是恰当的论述。

六年前我在史蒂芬斯技术学院度过一个学期，本书的写作就是在那时开始的。我要感谢J. G. Daunt博士及其同事，因为他们邀请我去学院并使我在逗留期间感到非常愉快。我还要感谢给予帮助的许多其他同事，特别是M. G. Brereton博士，T. Dosdale博士，D. Greig博士，A. M. Guenault博士和P. Rhodes博士，他们阅读了本书的某几章或全部，并提出了意见。

我还要感谢建议编写这本书的Bryan Coles教授，特别是在组织本书第十二章的材料方面，他给予了耐心的帮助。最后，我要十分感谢Marian Sawyer小姐，她迅速、仔细地打印了本书的稿本。

J. S. D.

1976年于利兹

主要符号表

a	原子间距	k_F	费密波数
A	振幅	K	散射波矢
c	真空中光速	l	$\left\{ \begin{array}{l} \text{相干长度} \\ \text{角动量量子数} \end{array} \right.$
C_v	定容比热	m	
d	晶面间距	m_s	磁量子数
$D(E)$	态密度	M	离子质量
e	电子电荷	n	单位体积电子数
$\mathcal{E}$	电场	N	单位体积离子数
E	能量	p	单位体积空穴数
E_F	费密能	P	几率
f	分布函数	q	声子波数
f_0	平衡态费密分布函数	r_0	原子球半径
g	朗德分裂因子	R	约化电阻率
G_n	到格矢	R_H	霍耳系数
h	普朗克常数	S	温差电动势率
$\hbar$	$h/2\pi$	S, A	费密面面积
H	磁场	t	时间
$\mathcal{H}$	哈密顿量	T	温度
j	电流密度	v	速度
J	交换参量	v_F	费密速度
k_x, k_y, k_z	电子波矢分量	V	势
k	$\left\{ \begin{array}{l} \text{玻耳兹曼常数} \\ \text{电子波数} \end{array} \right.$	W	热阻

x	浓度
Z	原子价差值
α	屏蔽参数
γ	电子比热系数
δ	相移
ε	电子能量
θ_D	德拜特征温度
λ	波长
λ_F	费密波长
μ	汤姆孙热
μ_B	玻尔磁子
ν	内场参数

Π	珀耳帖热
ρ	电阻率
σ	电导率
$\sigma(\theta)$ $\sigma_{\text{有效}}$	} 散射截面
τ	
ϕ	弛豫时间
χ	波函数
ψ	磁化率
ω	波函数
ω_c	角频率
Ω	回旋频率
	立体角

目 录

主要符号表

第一章 体输运性质

1.1	引言	(1)
1.2	电阻率	(1)
1.3	霍尔系数	(5)
1.4	温差电动势率	(7)

第二章 输运性质的简单描述

2.1	引言	(12)
2.2	电导率	(13)
2.3	霍尔效应	(16)
2.4	温差电效应	(20)

第三章 固体中的电子

3.1	引言	(25)
3.2	晶体中的周期势场	(26)
3.3	电子速度	(31)
3.4	态密度	(32)
3.5	倒格子和布里渊区	(35)
3.6	电子和晶格之间的相互作用	(39)
3.7	概述及倒格子的形式定义	(42)
3.8	布里渊区	(43)

第四章 外场对电子运动的影响

4.1	运动方程	(50)
4.2	有效质量张量	(52)
4.3	稳定磁场的影响	(55)
4.4	稳定电场对能带中电子的影响	(58)
4.5	一些数量级	(60)

4.6	金属和绝缘体	(63)
-----	--------------	--------

第五章 半导体中的电子和空穴

5.1	空穴的性质	(66)
5.2	平衡态下电子和空穴的数目	(70)
5.3	半导体中的杂质	(75)
5.4	半金属	(78)

第六章 输运系数

6.1	引言	(81)
6.2	玻耳兹曼方程	(81)
6.3	外场的影响	(83)
6.4	碰撞的影响	(84)
6.5	稳态分布	(85)
6.6	电导率	(85)
6.7	半导体的电导率	(94)
6.8	霍耳系数	(95)
6.9	半导体的霍耳系数	(102)
6.10	温差电动势率	(105)
6.11	金属的温差电动势率	(108)
6.12	金属的温差电动势率 S 的计算	(110)
6.13	声子曳引	(112)
6.14	半导体的温差电动势率 S 的计算	(113)

第七章 散射 (1) : 静态缺陷

7.1	引言	(114)
7.2	散射理论的一些概貌	(119)
7.3	金属的剩余电阻率	(130)
7.4	金属中的杂质	(134)
7.5	散射的相移分析	(144)
7.6	夫里德耳 (Friedel) 求和定则	(148)
7.7	杂质散射与温差电动势率	(153)

7.8	杂质散射与霍耳系数	(154)
第八章 散射(2): 晶格振动		
8.1	散射几何	(156)
8.2	U-过程	(158)
8.3	在高温下简单金属的电阻率对温度的依赖关系	(163)
8.4	在低温下电阻率对温度的依赖关系	(165)
8.5	在中间温度下电阻率对温度的依赖关系	(169)
8.6	声子散射引起电阻率的量级	(169)
8.7	约化电阻率	(171)
8.8	动量守恒	(174)
8.9	电子散射和声子平衡	(175)
8.10	温差电现象中的声子曳引	(176)
8.11	高温下的声子曳引	(180)
8.12	半导体中声子曳引的温差电动势率	(182)
8.13	声子散射和扩散温差电动势率	(184)
8.14	声子散射和霍耳系数	(185)
第九章 散射(3): 磁离子		
9.1	相互作用的性质	(186)
9.2	磁性杂质对电子的散射	(190)
9.3	孤立磁离子的散射——近藤效应	(193)
9.4	通过内场相互作用的磁杂质	(201)
9.5	铁磁金属中自旋波散射	(210)
9.6	近铁磁金属-自旋起伏	(216)
9.7	绝对零度下起伏的散射	(224)
第十章 多种机构的散射		
10.1	电阻率	(227)
10.2	霍耳系数	(231)
10.3	温差电动势率	(232)
10.4	两带模型	(235)

10.5 结论	(243)
第十一章 过渡金属	
11.1 过渡金属电阻率的大小	(248)
11.2 高温下的电阻率	(256)
11.3 在低温下由声子散射而引起的电阻率	(251)
11.4 镍的电阻率——自旋混合	(253)
11.5 电子-电子相互作用	(257)
11.6 简单金属中电子-电子散射	(262)
11.7 霍耳系数	(263)
11.8 温差电动势率	(264)
第十二章 浓合金的电阻率	
12.1 无序合金	(267)
12.2 合金的有序化	(270)
12.3 加入合金元素后能带结构的变化	(273)
12.4 金属间化合物的电阻率	(287)
参考文献	(291)
索引	(294)

第一章 体输运性质

1.1 引言

在本书中我们将要了解比较简单的固体的一些电学性质。将主要研究三类晶态金属或合金。

(1) 简单的非过渡金属, 如钾、钠、铜、银、金;

(2) 过渡金属, 如钨, 铂, 镍;

(3) 无序合金, 如银-金和银-钨系。

为了清楚地了解金属的特征及其性质, 我还要把这些与半导体的相应性质作比较, 但是, 我们的主要兴趣在金属和合金。

1.2 电 阻 率

我们将讨论的第一个性质是电阻率。总的说, 电阻率的测量是简单的: 若测出具有已知长度 L 和已知均匀截面 A 的样品的电阻 R , 则电阻率 ρ 由下式给出:

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (1.1)$$

在这里讨论的大多数具有立方对称的材料中, ρ 和它的倒数, 电导率 σ , 是标量(当加上磁场时, 这个结论就不再是正确的, 因为 ρ 和 σ 变成张量)。

表1.1中列出了某些固体在室温下的电阻率值。对金属和半导体的情况, 这些数值是指高纯材料的。

从这个表可以看到, 半导体Ge和Si具有以数百欧姆·厘米度量的电阻率。另一方面, 金属的电阻率一般都很小, 欧姆·厘

表1.1 若干固体在室温下（除说明的以外）电阻率的比较

固 体	近似电阻率（欧姆·厘米）
聚四氟乙烯	10^{20}
金刚石	10^{14}
窗玻璃	10^{12}
硅（纯）	10^5
锗（纯）	500
锗（重掺杂）	1
镍铬电阻丝	10^{-4}
镍	7×10^{-6}
钾	7×10^{-6}
铜	2×10^{-6}
钾（纯，在4开下）	10^{-10}

米这个单位显得太大，很不方便；对于这些材料，以微欧姆·厘米（欧姆·厘米的百万分之一）为单位更合适。为了比较还列入了一些绝缘材料。它们的电阻率为半导体的 10^{18} 倍，为金属的 10^{25} 倍。

那么，比如说在1开这样的低温下，这些电阻率会发生什么变化呢？一些值列在表1.2中，在表中我还列入了含5%原子银的钯合金的值。尽管金属和合金的电阻率值均下降，而锗和硅的值却上升。前者是金属性能的特征，后者是半导体性能的特征。

表1.2

材 料	室温下电阻率 (微欧·厘米)	1开下的近似电阻率 (微欧·厘米)	比 值 $\frac{\rho(300\text{开})}{\rho(1\text{开})}$
钾	7	10^{-6}	$\sim 10^7$
钯	10	3×10^{-4}	$\sim 3 \times 10^4$
钯-5%银	20	10	~ 2
锗	4.7×10^8	$\sim 10^{18}$	10^{-10}

这些变化和量值的差别是我们将要了解的两个特点。

在电阻率对温度的依赖关系方面，合金显示出特有的性能。表1.2第四栏列出了室温电阻率与1开下电阻率的比值，从该栏可以看到尽管纯金属电阻率的改变达几个数量级，而合金电阻率的改变却只有1倍。这是我们要了解的另一个特点。

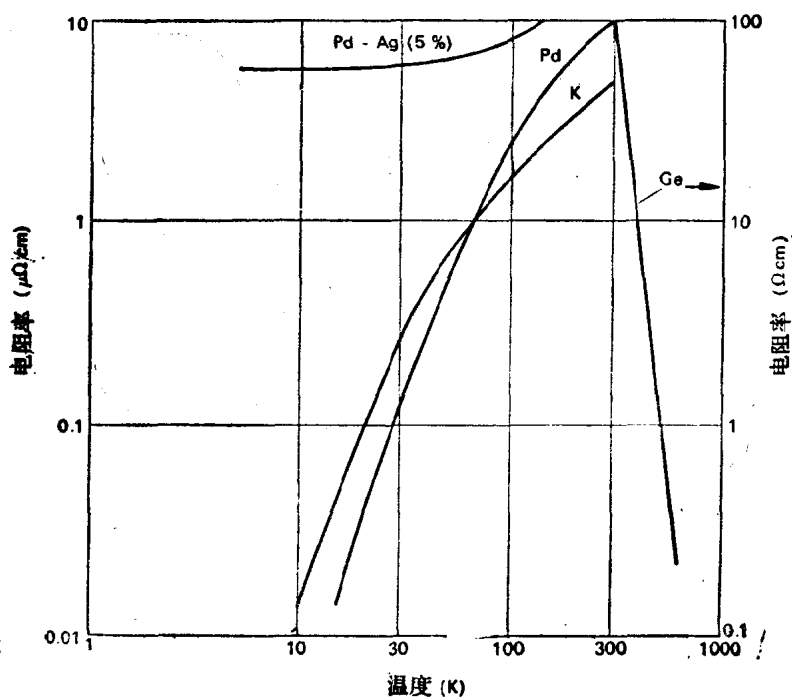


图1.1(a) 一些材料的电阻率作为温度的函数。K, Pd和Pd-Ag的电阻率由左边标度给出, Ge的电阻率由右边给出。

为了突出和扼要地表示各种材料的电阻率之间的差别，在图 1.1 (a) 中，以对数标度示出在宽广的温度范围内一些材料的电阻率是怎样依赖于温度的。锗样品的具体性能实际上对它可能含有的任何杂质是非常敏感的（也正是这一特性把半导体和金属区别开来）。不过主要特点还是清楚的，纯金属的电阻率随温度降低而降低；半导体的电阻率随温度降低迅速升高；合金的电阻率的改变比较小。图 1.1 (b) 以线性标度示出钾（简单金属的典

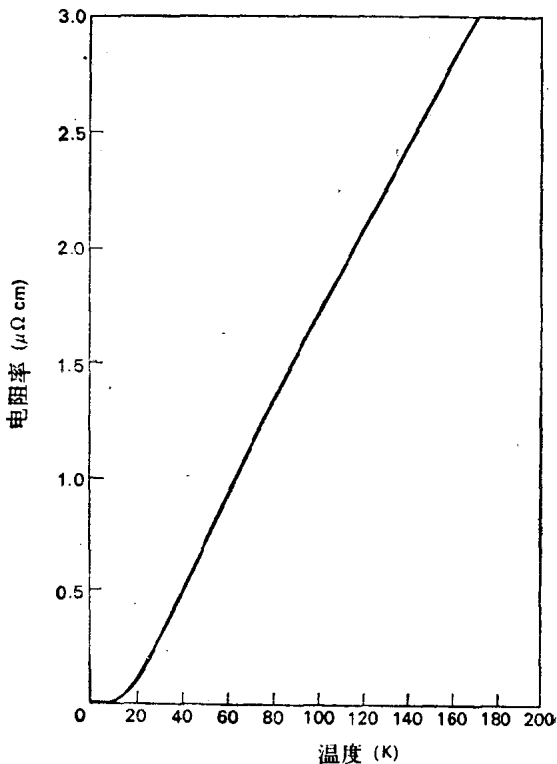


图 1.1 (b) 在恒定密度下，纯钾的电阻率。

例) 的电阻率怎样随温度变化; 在高温下, 它与温度成正比, 但在较低的温度下电阻率变化要快得多 (如 T^2 或更快^①)。

下面, 我们将简要地考虑两个后面要涉及的电输运性质: 霍耳系数和温差电动势率。

1.3 霍耳系数

为了测量霍耳系数, 可使一已知电流 I 通过导体, 在与电流成直角的方向上加一磁场 H 并测量在样品中与 I 和 H 都垂直的方向上出现的电动势 ΔV 。在弱场下, 发现 ΔV 与 I 和 H 都成正比。比例常数和霍耳系数 R_H 有密切的关系, 不过, 在 R_H 的定义中, 用的是电流密度 j , 而不是电流本身, 并用横向电场 E_H 代替 ΔV 。于是, 这样定义 R_H :

$$E_H = R_H j H \quad (1.2)$$

正象我们要求的那样, 这使得 R_H 与样品的尺寸无关。如果样品的宽度是 b , 在它两端测出 ΔV , 则 $E_H = \frac{\Delta V}{b}$ 。如果垂直于 b 的 (矩形) 样品厚度为 d , 那么, 截面积是 bd , 因而

$$j = I/bd$$

因此, 我们最后有:

$$\frac{\Delta V}{b} = R_H \frac{I}{bd} H \quad (1.3)$$

或

$$R_H = \frac{\Delta V d}{I H} \quad (1.4)$$

上式表明为了决定 R_H 必须测量什么量, 唯一需要的尺寸是

^① 详见本书第八章8.4节。——译者注

d ，即在磁场方向上样品的厚度。

象我们将看到的那样，霍尔系数能够给出关于固体中载流子数目的有用知识。另一方面，至少对较简单的金属，它不具有明显的温度依赖关系。在一级近似下，至少在碱金属中 R_H 与温度无关，但在极低的温度下它有些变化，如图1.2所示。同样，在别的金属中，虽然并不明显，但 R_H 随温度也有些变化。

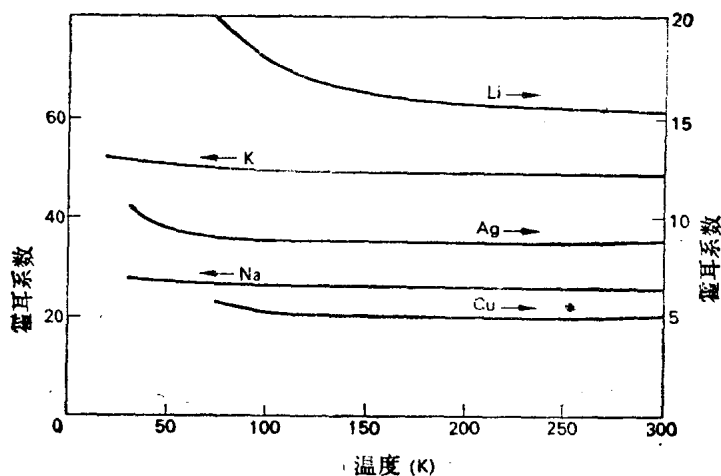


图1.2 某些金属的霍尔系数随温度的变化。

相比之下，半导体的性能是完全不同的，它们的霍尔系数随温度的增加成指数下降，如图1.3所示。