

固体物理基础

[英]拉 顿 约翰·威尔逊 著

刘阳君 张宝峰 译

天津科学技术出版社

固体物理基础

〔英〕 拉 顿 著
约翰·威尔逊

刘 阳 君 译
张 宝 峰

天津科学技术出版社

固体物理基础

〔英〕拉 顿 著
约翰·威尔逊

刘 阳 君 译
张 宝 峰

责任编辑：李运通

天津科学技术出版社出版

天津市赤峰道124号

天津新华印刷一厂印刷

新华书店天津发行所发行

开本 850×1168毫米 1/32 印张 6.375 字数 159,000

一九八四年十月第一版

一九八四年十月第一次印刷

印数：1 - 7,900

书号：13212·82 定价：1.10元

内 容 提 要

本书采用简单的模型，从固体的微观结构出发阐述了固体物理学的基本概念，其中包括经典导电理论和磁学，固体能带理论，导电的量子理论，晶体结构和半导体器件。书中各章之后列有适量附有解答的习题，书末列有讨论题。

本书适合于物理学、材料科学和电子电气工程专业的低年级学生阅读，也可供有关专业的工程技术人员参考。

目 录

前言	(1)
序言	(3)
第一章 近代物理学的几个方面	(4)
1.1 黑体辐射公式	(5)
1.2 固体的比热	(7)
1.3 谱线	(9)
1.4 原子结构	(10)
1.5 光电效应	(12)
1.6 德布罗意假设	(16)
1.7 氢原子的玻尔理论	(20)
1.8 小结	(26)
习题	(26)
第二章 导电和磁学的经典理论	(27)
2.1 固体中的电荷载体	(28)
2.2 金属中的导电——经典处理	(29)
2.2.1 欧姆定律	(31)
2.2.2 威德曼-弗朗兹定律	(33)
2.3 经典导电理论的失败	(35)
2.3.1 平均自由程	(35)
2.3.2 比热	(36)
2.3.3 霍耳效应	(36)
2.3.4 小结	(38)
2.4 固体的磁性	(39)
2.4.1 磁性的原子理论	(40)
2.5 磁性的分类	(47)
2.5.1 抗磁性	(47)

2·5·2 顺磁性	(48)
2·5·3 铁磁性	(49)
2·5·4 铁氧体磁性	(54)
习题	(57)
第三章 固体中的能带	(58)
3·1 波动方程	(58)
3·1·1 稳定状态	(59)
3·1·2 ψ 的物理意义	(60)
3·2 一维势阱中粒子的薛丁谔方程的解	(62)
3·3 三维势阱中粒子的薛丁谔方程的解	(64)
3·4 简并的消除	(67)
3·5 原子的集聚	(69)
3·6 费米能级	(72)
3·7 能带的实验研究	(74)
3·8 经典统计和量子统计	(78)
3·9 根据能带理论进行固体分类	(82)
习题	(83)
第四章 导电的量子理论	(84)
4·1 能带中电子的性质	(84)
4·1·1 满带	(84)
4·1·2 部分填充能带	(85)
4·1·3 正空穴	(86)
4·1·4 平均自由程	(89)
4·2 半导体的电性质	(90)
4·2·1 非本征半导体	(91)
4·3 半导体中的费米能级	(94)
4·4 半导体的电导率	(97)
4·5 半导体的光学性质	(99)
4·6 热电子发射	(106)
习题	(108)
第五章 晶体结构	(110)

5.1	固体的结构	(110)
5.2	X射线晶体衍射	(111)
5.2.1	X射线衍射——粉末法	(114)
5.3	理想晶体的几何形状	(115)
5.4	米勒指数	(118)
5.5	晶胞结构	(121)
5.5.1	立方结构	(121)
5.5.2	六方结构	(122)
5.6	原子键	(124)
5.6.1	离子键	(125)
5.6.2	共价键	(127)
5.6.3	金属键	(129)
5.6.4	其他键	(130)
5.7	实际晶体	(130)
5.8	结晶物质中的缺陷	(131)
5.8.1	点缺陷	(131)
5.8.2	线缺陷	(132)
5.8.3	面缺陷	(134)
5.8.4	声子	(135)
5.9	晶体生长技术	(136)
5.9.1	丘克拉斯基法	(138)
5.9.2	布里兹曼-斯托克贝法	(139)
5.9.3	浮区熔法	(140)
5.10	固体器件制造	(140)
	习题	(148)
第六章 半导体器件		(149)
6.1	金属-金属结	(149)
6.2	金属-半导体结	(153)
6.3	半导体-半导体结器件	(156)
6.3.1	$p-n$ 结二极管	(156)
6.3.2	齐纳二极管	(163)
6.3.3	隧道二极管	(165)

6.4	光电二极管	(167)
6.5	双极面结型晶体管	(171)
6.5.1	晶体管特性曲线和放大系数	(174)
6.6	场效应晶体管	(177)
6.6.1	面结场效应晶体管	(178)
6.6.2	金属-氧化物-半导体晶体管	(180)
6.7	结束语	(182)
	习题	(183)
	讨论题	(184)
	习题答案	(187)
附录 1	300K时半导体材料的性质	(191)
附录 2	导出国际制单位	(192)
附录 3	某些物理常数推荐值	(193)
	译者后记	(194)

前 言

几年以前，在泰因河畔纽卡斯尔工业大学的物理学及物理电子学系，成立了一个研究小组，专门研究HND和D课程的固体物理教法。在讨论中发现，适当水平的教科书很缺乏，随后又要求两位作者给那些最多只有GCE初级水平的学生教授固体物理学。在教学中感到：缺乏适当的教材对学生学习实在是一个很大的障碍。当时已有的固体物理方面的参考书，虽然多很好，但是都过分地依赖于概念；而这些概念对一年级学生来说是难于接受的。因此，所有这些书对于越来越多的学习入门阶段的固体物理的学生，过去是、现在仍然是不适合的，对他们中的许多人来说，只需要足够的基础知识来理解近代固体电子器件的工作原理就可以了。

正是基于这样一些考虑，两位作者于1971年曾经写出了第一本教科书——《固体物理学入门》。当时，作者期望那本书能借助模型引入概念，设法摆脱高深的数学推导，尽可能简单地对这门学科作一介绍。根据那本书用于许多不同课程的实际效果和学生们反应，作者感到有必要将那本书的材料作某种重新安排和说明；作者还试图进一步阐明某些新课题，以与1971年以来所发生的变化相适应。

本书每章的末尾，都附有习题，以帮助读者理解书中所提供的材料，其中许多习题是取自纽卡斯尔的试题。这些习题决不是那种代数学的练习，它能扩充学生们有关本学科的知识。习题解答及提示附在本书末尾。

两位作者感谢他们的同事们与他们所进行的多次富有成果和

促进作用的讨论，并感谢他们的妻子对他们的鼓励以完成改写原书的任务。他们还要感谢玛格丽特·波德曼夫人打印了全部手稿。

序 言

近年来，“固体”的说法渐渐地成为人们日常的话题之一了。但是，是不是很多人都了解这个名词的含义，还是很有疑问的。实际上，在物理学历史上，这个名词出现并不久，第一次正式使用不过是在第二次世界大战的前夕。

对固体中的电子性质的注意是由玻尔在20世纪初提出来的，正是以他和他在哥廷根的同事们的工作为开端，并由于生长纯单晶的技术的发展，最后导致了近代半导体物理基础理论的建立。1933年玻尔曾预言，无线电技术中所使用的真空管最终一定会被小晶体所取代，这种小晶体中的电子运动是可以控制的。1948年7月1日，纽约时报宣布：称为晶体管的硅器件已经成功地用作放大器。随着这一消息的发布，玻尔的预言变成了现实，所谓电子革命就这样开始了，电子革命对人类社会生活的影响甚至比19世纪电子工业革命更加引人注目。一个以上的晶体管，可以集中到一块很小的硅片上，这一发现曾经喧赫一时，并且导致了集成电路的出现，即现在所谓的“集成电路块”。不过，不管在一个针头大小的硅片上能排下多少个元件，本书所阐述的固体物理学的基本原理都是适用的，而且对二极管和晶体管的工作原理的掌握仍然是理解当代最先进的固体线路的工作原理的基础。

第一章 近代物理学的几个方面

本书的大多数读者对所谓经典物理的许多方面大概都已经很熟悉，例如牛顿运动定律、几何光学定律、声振动以及许多其他现象。

十九世纪末，物理学家们曾经一度以为，所有已经建立起来的物理学定律都经过了长期的检验和证明，世界上的事物似乎都已经各得其所了，只剩下一、两个问题还有些争议，例如光到底是粒子流呢还是波这样的问题。而且，当时并不存在任何正当的理由怀疑由牛顿（Newton）、胡克（Hooke）和法拉第（Faraday）等这些伟大人物所提出来的种种假设。

然而，物理学领域中却正在酝酿着一场革命，这场革命要彻底地改变物理学家们的这些观点。物理学当时所面临的形势，很象音乐领域中当时所面临的形势。十九世纪末，人们已经十分熟悉巴赫（Bach）、比瑟温（Beethoven）和莫扎特（Mozart）等人的音乐作品，他们的这些作品已经成为“古典”音乐的传统。因此，毫不奇怪，象斯特拉温斯基（Stravinsky）、巴托克（Bartok）这些作曲家们早期的音乐作品似乎是莫名其妙、不可理解的，并且完全违反了已经建立起来的关于节奏、和声与旋律配合方面的规律。但是，“近代”音乐毕竟还是发展起来了，并且为广大的听众所欣赏。

那么为什么“物理学革命”却姗姗来迟呢？其主要原因在技术方面。直到十九世纪中叶，物理学实验还只能对一些宏观的现象进行研究，例如弹性球的碰撞、线绳波的振动以及重力场中的自由落体现象等。而只有能够对原子的碰撞、原子能态的改变、光波与物质的相互作用等这些微观现象进行研究时，经典理论的

不足之处才开始表现出来；况且谁也没有看到过原子的内部结构，因为大家都以为原子是没有什么内部结构的。

物理学革命一经开始即推向了高潮，实验技术不断地提高，为解释实验结果所提出的理论越来越成熟。例如，在短短几年的时间里，汤姆逊 (J.J.Thomson)证实了电子(电荷的基本单位)的存在；伦琴 (Röntgen)发现了X射线；贝克勒尔(Bequerel)发现了天然放射性；同时，普朗克 (Planck)提出了一个假设，即辐射与物质发生相互作用时，辐射能量是量子化的。也就是说，辐射能量是以极小的不连续量而存在的，这一假设最终导致了量子力学的发展。也正是在此期间，爱因斯坦 (Einstein)重新探讨了物理学的基本概念，从而导致了相对论的发现。

量子论的发展很可能是物理学的最显著的进步，因为量子论能够解释以牛顿定律、库仑定律和麦克斯韦定律为基础的经典物理所不能解释的一些实验现象。

下面我们将概括地介绍一些奠定了近代物理基础的实验和理论。

1.1 黑体辐射公式

经典物理学根本无法解释炽热物体的连续光谱（即黑体辐射）的能量分布，普朗克的量子假说正是由此而产生的。

图1.1为卢默 (Lummer) 和普林希姆 (Pringsheim) 所获得的不同温度下的实验曲线。由图可见，当温度升高时，一定波长下的辐射能量将增加，相应于能量极大值的波长 λ_{max} 将向波长减小的方向移动。对图1.1的曲线加以分析可以证明，乘积 $\lambda_{max} \cdot T$ 为一常数（等于 $2.898 \times 10^{-3}MK$ ），其中 T 为绝对温度。

这种关系叫做维恩 (Wien) 位移定律，可利用经典热力学理论推导出来。但是，企图利用经典定律确定一个对一切实际的能量分布曲线都适合的公式的一切尝试都毫无例外地归于失败，

维恩所得出的经验公式也只是在 $\lambda < \lambda_{max}$ 的波长范围内与 T 值比较小时的实验结果近似相符。

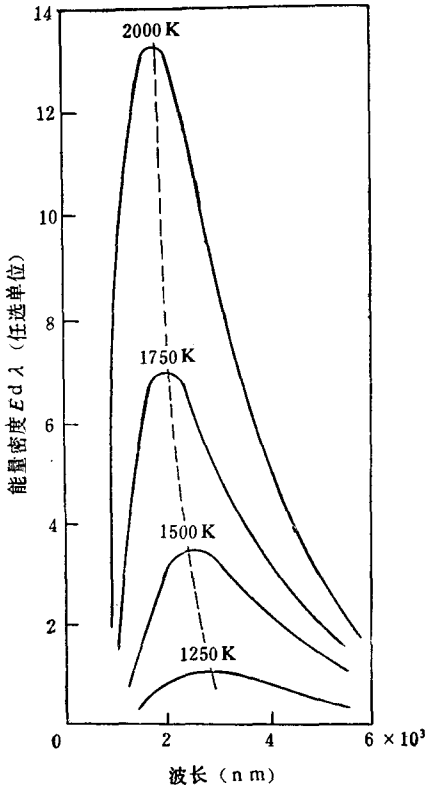


图 1.1 不同温度下黑体辐射能谱
“紫外灾难”。

正确的黑体辐射公式是1901年由普朗克发现的。普朗克同瑞利、琼斯一样，也假设辐射是由带电振子发射和吸收的，所不同的是，他没有采用能量均分的原则，而假设频率为 ν 的辐射，其能量只能以 $h\nu$ 为单位被振子发射或吸收，其中 h 为能量与频率之间的比例常数，叫作普朗克常数。于是，振子的能量就不可能连续

瑞利 (Rayleigh) 和琼斯 (Jeans) 也曾试图利用经典物理学将理论与实验联系起来。他们假设辐射是由带电振子发射出来的，而每个振动模的能量为 kT ，其中 k 为玻耳兹曼 (Boltzmann) 常数，从而得出了一个公式，即 $E_\lambda = 8\pi kT\lambda^{-4}$ 。这个公式对于比较长的波长来说与实验结果是一致的，但对于 λ_{max} 附近以及远小于 λ_{max} 的波长来说，这个公式所给出的结果比实验值要大得多。这个公式的最明显的失败之处是它预言在波长很短时总能量将趋向于无限大，这就是所谓的“紫外灾难”。

地变化，而只能取一组不连续值 $0, h\nu, 2h\nu, 3h\nu \dots$ 等其中之一。从这个假设出发，普朗克推导出了与实验所确定的能量分布曲线完全相符的公式，即

$$E_\lambda = C_1 \lambda^{-5} \frac{1}{\exp(C_2/kT) - 1}$$

其中 C_1 和 C_2 为常数。

必须指出，辐射系统不连续的能量值或能级的概念是与经典概念截然不同的。经典理论认为能量的改变是平滑的，总能量可以取连续值，而普朗克假说认为能量的改变是陡峭的、不连续的，总能量只能取不连续的数值。

1.2 固体的比热

当有可能在很宽的温度范围内测量固体比热的变化时，经典物理的不足之处就得到了进一步的证实，而且证明了在很低的温度下，固体的比热趋近于零。如图1.2所示。

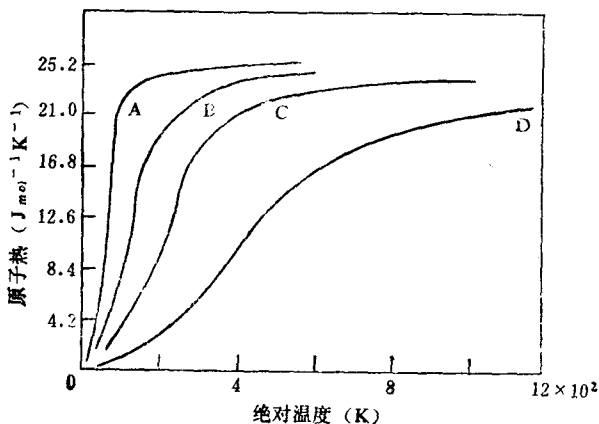


图 1.2 原子热随温度的变化
A—铅；B—铝；C—硅；D—金刚石

杜隆 (Dulong) 和普蒂 (Petit) 证明, 所有固体物质的原子量与比热容量的乘积都是相同的。常温下, 这个定律对许多物质都是成立的, 这个乘积的平均值叫做原子热, 等于 $25.7 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 。

不过也有少数例外, 其中包括硼、硅和金刚石型的碳, 室温下它们的原子热分别为 $14.0 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $20.7 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $6.1 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 。对这些物质曾进行过大量的研究, 发现它们的比热容量随温度急剧地变化。实际上, 从 300 K 至 500 K , 金刚石的比热容量增加了三倍。然而更重要的发现是, 所有固体的比热容量在足够低的温度下, 随温度下降急剧减小; 而且所有曲线都具有相同的形式, 适当地调整一下温度坐标即可使这些曲线几乎完全重合。人们猜测, 这样明显的规律性可能产生于一种简单的普遍原理。

经典物理学认为, 固体中的原子只是在平衡位置附近振动, 而并不象液体或气体原子那样漂移不定。于是, 固体的原子颇象有三个自由度的三维简谐振子, 当这些原子约束在平衡位置时, 它们既具有动能又具有位能。根据能量均分定律, 一克原子的总能量为

$$E = N \times 6 \times \frac{1}{2} kT$$

式中 N 为阿佛加德罗 (Avogadro) 常数 (一克分子重量的原子数), k 为玻耳兹曼常数。因此, 原子热为

$$C_v = dE/dT = 3Nk$$

由于 $k = R/N$ (其中 R 为普适气体常数, 等于 $8.32 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), 所以

$$C_v = 3R$$

原子热的这一表达式是完全由经典理论推导出来的, 它与温度无关, 但显然随实验观测值而改变。1907年爱因斯坦用 $h\nu/(eh\nu/kT - 1)$ 代替振子的平均能量 kT , 从而改善了实验和理论之

间的一致性。爱因斯坦得出

$$C_v = 3R \left[\frac{e^{h\nu/kT}}{(e^{h\nu/kT} - 1)^2} \cdot \left(\frac{h\nu}{kT} \right)^2 \right]$$

高温时 C_v 接近于 $3R$ ，而在低温时则迅速减小，除了在极低的温度下以外，与实验值符合得很好。德拜 (Debye) 消除了这一偏差，他也跟爱因斯坦一样，假设原子振子的振动频率 ν 不是固定的，不同的振子可以有不同的频率。

1.3 谱 线

试图解释气体元素所发射的特殊不连续光谱时，经典物理就更是无能为力了。仔细地检查这些谱线发现，各种不同的谱线属于不同的“谱线系列”；各系列中谱线之间的距离，随波长的减小而减小，最后会聚于一个确定的极限值。科学家们自从能够可靠地测量波长时就开始按照声学中的谐波原理来寻找谱线之间的谐振关系，结果虽然失败了，但是里兹 (Ritz) 和巴尔默 (Balmer) 却成功地推导出了表示某系列中谱线的波数($1/\lambda$)之间关系的经验公式。例如，1885年巴尔默研究了最简单的光谱即氢光谱，并用以下的公式来表示当时已知的谱线：

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (1.1)$$

式中 $n=3, 4, 5, \dots$ ， R_H 叫作里德堡 (Rydberg) 常数， λ 为波长。

这个公式是用类似的两项差的关系式来表示其他元素的谱线系列的关键，但是所有用经典的方法来预言这个公式或者解释不连续谱线的存在的企图都失败了，只有玻尔利用量子化能量的概念对实验结果作出了理论解释。

应当指出的是，虽然普朗克假说奠定了近代量子理论和波动力学的基础，但是从那以后，普朗克原先的思想已经有了明显的