

材料科学与工程系列



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

Solid State Physics  
(Second Edition)

# 固体物理

第2版

韦丹著



清华大学出版社

材料科学与工程系列



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

Solid State Physics  
(Second Edition)

# 固体物理

第2版

韦丹 著

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书是新一版的固体物理学教材,作者力图从原创的科学家的思想出发,介绍固体物理学中主要的概念、实验和理论,其中包括了固体物理学史、化学键与晶体组成、固体结构、晶体振动和固体热性质、固体电子理论、固体的电性质(输运过程)、固体的磁性、固体的介电性质和光学性质等内容。本书适合涉及电子、器件与材料专业的本科生或研究生学习。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

## 图书在版编目(CIP)数据

固体物理/韦丹著.—2版.—北京:清华大学出版社,2007.10

(材料科学与工程系列)

ISBN 978-7-302-15996-4

I. 固… II. 韦… III. 固体物理学 IV. O48

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第132743号

责任编辑:宋成斌 洪 英

责任校对:赵丽敏

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

[c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

社总机:010-62770175

投稿咨询:010-62772015

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

邮购热线:010-62786544

客户服务:010-62776969

印刷者:清华大学印刷厂

装订者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:175×245 印 张:18.25 插 页:2 字 数:364千字

版 次:2007年10月第2版

印 次:2007年10月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:33.00元

---

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。  
联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:021780-01



**NOBLE ELEMENTS**

HELIUM	4.0026
0.178 He	2
$1s^2$	
3.57 HEX	1.633
~1.0 (26 Atm) 26 <sup>LT</sup>	

3A		4A		5A		6A		7A					
BORON 10.81	CARBON 12.01	NITROGEN 14.007	OXYGEN 15.999	FLUORINE 18.998	NEON 20.18								
<b>2.34 B</b> 5	<b>2.26 C</b> 8	<b>3.03 N</b> 7	<b>3.43 O</b> 8	<b>3.97 (a) F</b> 9	<b>1.56 Ne</b> 10								
$1s^2 2s^2 2p^2$	$1s^2 2s^2 2p^2$	$1s^2 2s^2 2p^3$	$1s^2 2s^2 2p^4$	$1s^2 2s^2 2p^5$	$1s^2 2s^2 2p^6$								
<b>9.73 TET</b> 0.576	<b>3.57 DIA</b>	<b>4.038 HEX</b> 1.461	<b>4.83 CUB</b>	<b>5.35 MCL</b>	<b>4.43 FCC</b>								
<b>2600</b> 1250	<b>14300</b>	<b>1860</b>	<b>63.3</b> (β) 79 <sup>LT</sup>	<b>54.7</b> (γ) 46 <sup>LT</sup>	<b>53.5</b>								
ALUMINUM 26.982	SILICON 28.086	PHOSPHORUS 30.974	SULFUR 32.064	CHLORINE 35.453	ARGON 39.948								
<b>3.70 Al</b> 13	<b>2.33 Si</b> 14	<b>3.12 (white) P</b> 15	<b>2.07 S</b> 16	<b>2.06 Cl</b> 17	<b>1.78 Ar</b> 18								
$[\text{Ne}] 3s^2 3p^1$	$[\text{Ne}] 3s^2 3p^2$	$[\text{Ne}] 3s^2 3p^3$	$[\text{Ne}] 3s^2 3p^4$	$[\text{Ne}] 3s^2 3p^5$	$[\text{Ne}] 3s^2 3p^6$								
<b>4.05 FCC</b>	<b>5.43 DIA</b>	<b>3.17 CUB</b>	<b>10.47 ORC</b> $\frac{2338}{1.226}$	<b>5.24 ORC</b> $\frac{1.224}{0.718}$	<b>5.26 FCC</b>								
<b>933</b> 394	<b>1683</b> 625	<b>317.3</b>	<b>386</b>	<b>172.2</b>	<b>83.9</b>								
1B		2B		3B		4B		5B		6B		7B	
NICKEL 58.71	COPPER 63.55	ZINC 65.38	GALLIUM 69.72	GERMANIUM 72.59	ARSENIC 74.922	SELENIUM 78.96	BROMINE 79.91	KRYPTON 83.80					
<b>8.9 Ni</b> 28	<b>8.96 Cu</b> 29	<b>7.14 Zn</b> 30	<b>5.91 Ga</b> 31	<b>5.32 Ge</b> 32	<b>5.72 As</b> 33	<b>4.78 Se</b> 34	<b>4.10 Br</b> 35	<b>3.07 Kr</b> 36					
$[\text{Ar}] 3d^8 4s^2$	$[\text{Ar}] 3d^{10} 4s^1$	$[\text{Ar}] 3d^{10} 4s^2$	$[\text{Ar}] 3d^{10} 4s^2 3p^1$	$[\text{Ar}] 3d^{10} 4s^2 4p^2$	$[\text{Ar}] 3d^{10} 4s^2 4p^3$	$[\text{Ar}] 3d^{10} 4s^2 4p^4$	$[\text{Ar}] 3d^{10} 4s^2 4p^5$	$[\text{Ar}] 3d^{10} 4s^2 4p^6$					
<b>3.52 FCC</b>	<b>3.61 FCC</b>	<b>2.66 HEX</b> 1.854	<b>4.51 ORC</b> $\frac{1.895}{1.001}$	<b>5.66 DIA</b>	<b>4.13 RHL</b> 54.10	<b>4.36 HEX</b> 1.136	<b>4.67 ORC</b> $\frac{1.307}{0.872}$	<b>5.72 FCC</b>					
<b>1726</b> 375	<b>1356</b> 315	<b>693</b> 234	<b>303</b> 240	<b>1211</b> 360	<b>1090</b> 285	<b>490</b> 150 <sup>LT</sup>	<b>266</b>	<b>116.5</b> 73 <sup>LT</sup>					
PALLADIUM 106.40	SILVER 107.87	CADMIUM 112.40	INDIUM 114.82	TIN 118.69	ANTIMONY 121.75	TELLURIUM 127.60	IODINE 126.90	XENON 131.30					
<b>12.0 Pd</b> 46	<b>10.5 Ag</b> 47	<b>8.65 Cd</b> 48	<b>7.31 In</b> 49	<b>7.30 Sn</b> 50	<b>6.82 Sb</b> 51	<b>6.24 Te</b> 52	<b>4.94 I</b> 53	<b>3.77 Xe</b> 54					
$[\text{Kr}] 4d^{10} 5s^0$	$[\text{Kr}] 4d^{10} 5s^1$	$[\text{Kr}] 4d^{10} 5s^2$	$[\text{Kr}] 4d^{10} 5s^2 5p^1$	$[\text{Kr}] 4d^{10} 5s^2 5p^2$	$[\text{Kr}] 4d^{10} 5s^2 5p^3$	$[\text{Kr}] 4d^{10} 5s^2 5p^4$	$[\text{Kr}] 4d^{10} 5s^2 5p^5$	$[\text{Kr}] 4d^{10} 5s^2 5p^6$					
<b>3.89 FCC</b>	<b>4.09 FCC</b>	<b>2.90 HEX</b> 1.886	<b>4.98 TET</b> 1.076	<b>5.82 TET</b> 0.646	<b>4.61 RHL</b> 57.6	<b>4.46 HEX</b> 1.330	<b>3.27 ORC</b> $\frac{1.347}{0.858}$	<b>5.20 FCC</b>					
<b>1825</b> 275	<b>1234</b> 215	<b>594</b> 120	<b>429.8</b> 124	<b>505</b> 170	<b>904</b> 200	<b>723</b> 139 <sup>LT</sup>	<b>387</b>	<b>161.3</b> 55 <sup>LT</sup>					
PLATINUM 195.05	GOLD 196.97	MERCURY 200.59	THALLIUM 204.37	LEAD 207.19	BISMUTH 208.98	POLONIUM 210	ASTATINE 210	RADON 222					
<b>21.4 Pt</b> 78	<b>19.3 Au</b> 79	<b>13.6 Hg</b> 80	<b>11.86 Tl</b> 81	<b>11.4 Pb</b> 82	<b>9.8 Bi</b> 83	<b>9.4 Po</b> 84	<b>At</b> 85	<b>(4.4) Rn</b> 86					
$[\text{Xe}] 4f^{14} 5d^{10} 6s^0$	$[\text{Xe}] 4f^{14} 5d^{10} 6s^1$	$[\text{Xe}] 4f^{14} 5d^{10} 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^{14} 5d^{10} 6s^2 6p^1$	$[\text{Xe}] 4f^{14} 5d^{10} 6s^2 6p^2$	$[\text{Xe}] 4f^{14} 5d^{10} 6s^2 6p^3$	$[\text{Xe}] 4f^{14} 5d^{10} 6s^2 6p^4$	$[\text{Xe}] 4f^{14} 5d^{10} 6s^2 6p^5$	$[\text{Xe}] 4f^{14} 5d^{10} 6s^2 6p^6$					
<b>3.92 FCC</b>	<b>4.08 FCC</b>	<b>2.99 RHL</b> 70.45	<b>3.48 HEX</b> 1.899	<b>4.95 FCC</b>	<b>4.75 RHL</b> 57.14	<b>3.36 SC</b>	<b>(1575)</b>	<b>(FCC)</b> (202)					
<b>2045</b> 230	<b>1337</b> 170	<b>234.3</b> 100	<b>577</b> 96	<b>601</b> 96	<b>88</b> 544.5	<b>120</b> 527							

8B		9B		10B		11B		12B		13B		14B	
EUROPIUM 151.96	GADOLINIUM 157.25	TERBIUM 158.92	DYSPROSIUM 162.50	HOLMIUM 164.93	ERBIUM 167.26	THULIUM 168.93	YTTERIUM 173.04	LUTETIUM 174.97					
<b>7.90 Eu</b> 63	<b>8.23 Gd</b> 64	<b>8.54 Tb</b> 65	<b>8.78 Dy</b> 66	<b>9.05 Ho</b> 67	<b>9.37 Er</b> 68	<b>9.31 Tm</b> 69	<b>6.97 Yb</b> 70	<b>9.84 Lu</b> 71					
$[\text{Xe}] 4f^7 5d^0 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^7 5d^1 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^7 5d^0 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^7 5d^0 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^{11} 5d^0 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^{12} 5d^0 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^{13} 5d^0 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^{14} 5d^0 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^{14} 5d^1 6s^2$					
<b>4.61 BCC</b>	<b>3.84 HEX</b> 1.868	<b>3.80 HEX</b> 1.981	<b>3.68 HEX</b> 1.573	<b>3.68 HEX</b> 1.670	<b>3.68 HEX</b> 1.670	<b>3.64 HEX</b> 1.670	<b>5.49 FCC</b>	<b>3.51 HEX</b> 1.986					
<b>1006</b> 107 <sup>LT</sup>	<b>1585</b> 176 <sup>LT</sup>	<b>1633</b> 188 <sup>LT</sup>	<b>1680</b> 186 <sup>LT</sup>	<b>1743</b> 191 <sup>LT</sup>	<b>1795</b> 195 <sup>LT</sup>	<b>1818</b> 200 <sup>LT</sup>	<b>1097</b> 118 <sup>LT</sup>	<b>1929</b> 207 <sup>LT</sup>					
AMERICIUM 243	CURIUM 247	BERKELIUM 247	CALIFORNIUM 251	EINSTEINIUM 254	FERMIUM 257	MENDELEVIUM 258	NOBELIUM 254	LAWRENCIUM 257					
<b>11.8 Am</b> 95	<b>Cm</b> 96	<b>Bk</b> 97	<b>Cf</b> 98	<b>Es</b> 99	<b>Fm</b> 100	<b>Md</b> 101	<b>No</b> 102	<b>Lw</b> 103					
$[\text{Rn}] 5f^7 6d^0 7s^2$	$[\text{Rn}] 5f^7 6d^1 7s^2$	$[\text{Rn}] 5f^7 6d^2 7s^2$	$[\text{Rn}] 5f^8 6d^1 7s^2$										
<b>1267</b>	<b>1600</b>												

基本物理量的国际单位制(SI)和高斯制(cgs)之间的转换

物理量	国际单位制	高斯制	单位换算关系
长度 $l$	m (meter)	cm (centimeter)	$1\text{m}=10^2\text{cm}, 1\text{in}=2.54\text{cm}$
时间 $t$	s (second)	s (second)	$1\text{Hertz}=\text{s}^{-1}$
质量 $m$	kg (kilogram)	g (gram)	$1\text{kg}=10^3\text{g}, 1\text{pd}=453.6\text{g}$
温度 $T$	K (kelvin)	K (kelvin)	$1^\circ\text{F}=(5/9)\text{K}$
电流 $I$	A (ampere)	esa [ $\text{g}^{1/2}\text{cm}^{3/2}/\text{s}^2$ ]	$1\text{A}=3\times 10^9\text{esa}$
能量 $U, W, Q$	Joule [ $\text{kg m}^2/\text{s}^2$ ]	erg [ $\text{g cm}^2/\text{s}^2$ ]	$1\text{J}=10^7\text{erg}$
力 $F$	Newton [ $\text{kg m}/\text{s}^2$ ]	dyne [ $\text{g cm}/\text{s}^2$ ]	$1\text{N}=10^5\text{dyne}$
电荷 $q$	Coulomb [As]	esu [ $\text{g}^{1/2}\text{cm}^{3/2}/\text{s}$ ]	$1\text{C}=3\times 10^9\text{esu}$
电流密度 $j$	$\text{A}/\text{m}^2$ [ $\text{A}/\text{m}^2$ ]	esa/ $\text{cm}^2$ [ $\text{g}^{1/2}/\text{cm}^{1/2}/\text{s}^2$ ]	$1\text{A}/\text{m}^2=3\times 10^5\text{esa}/\text{cm}^2$
电势 $V, \psi$	Volt [ $\text{kg m}^2/\text{s}^3/\text{A}$ ]	esv [ $\text{g}^{1/2}\text{cm}^{1/2}/\text{s}$ ]	$1\text{V}=\frac{1}{3}\times 10^{-2}\text{esv}$
电场强度 $E$	$\text{V}/\text{m}$ [ $\text{kg m}/\text{s}^3/\text{A}$ ]	esv/cm [ $\text{g}/\text{cm}^{1/2}/\text{s}$ ]	$1\text{V}/\text{m}=\frac{1}{3}\times 10^{-4}\text{esv}/\text{cm}$
电位移矢量 $D$	$\text{C}/\text{m}^2$ [ $\text{As}/\text{m}^2$ ]	esu/ $\text{cm}^2$ [ $\text{g}/\text{cm}^{1/2}/\text{s}$ ]	$1\text{C}/\text{m}^2=12\pi\times 10^5\text{esu}/\text{cm}^2$
电极化强度 $P$	$\text{C}/\text{m}^2$ [ $\text{As}/\text{m}^2$ ]	esu/ $\text{cm}^2$ [ $\text{g}/\text{cm}^{1/2}/\text{s}$ ]	$1\text{C}/\text{m}^2=3\times 10^5\text{esu}/\text{cm}^2$
磁通量 $\Phi$	Weber [ $\text{kg m}^2/\text{s}^2/\text{A}$ ]	Maxwell [ $\text{g}^{1/2}\text{cm}^{3/2}/\text{s}$ ]	$1\text{Wb}=10^8\text{Maxwell}$
磁感应强度 $B$	Tesla [ $\text{kg}/\text{s}^2/\text{A}$ ]	Gauss [ $\text{g}^{1/2}/\text{cm}^{1/2}/\text{s}$ ]	$1\text{T}=10^4\text{G}$
磁场强度 $H$	$\text{A}/\text{m}$ [ $\text{A}/\text{m}$ ]	Oersted [ $\text{g}^{1/2}/\text{cm}^{1/2}/\text{s}$ ]	$1\text{A}/\text{m}=4\pi\times 10^{-3}\text{Oe}$
磁化强度 $M$	$\text{A}/\text{m}$ [ $\text{A}/\text{m}$ ]	emu/ $\text{cm}^3$ [ $\text{g}^{1/2}/\text{cm}^{1/2}/\text{s}$ ]	$1\text{A}/\text{m}=10^{-3}\text{emu}/\text{cm}^3$

基本物理常数(下列公式是以 cgs 单位书写)

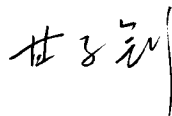
物理常数	国际单位制(SI)	cgs 制和其他
普朗克常数 $h$	$6.62606896\times 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$	$6.62606896\times 10^{-27}\text{erg}\cdot\text{s}$
阿伏伽德罗常数 $N_A$	$6.02214179\times 10^{23}/\text{mol}$	$6.02214179\times 10^{23}/\text{mol}$
真空光速 $c$	$299792458\text{m}/\text{s}$	$2.99792458\times 10^{10}\text{cm}/\text{s}$
质子质量 $m_p$	$1.672621637\times 10^{-27}\text{kg}$	$1.672621637\times 10^{-24}\text{g}$
原子质量单位 $m_a$	$1.660538782\times 10^{-27}\text{kg}$	$1.660538782\times 10^{-24}\text{g}$
玻耳兹曼常数 $k_B$	$1.3806504\times 10^{-23}\text{J}/\text{K}$	$1.3806504\times 10^{16}\text{erg}/\text{K}$
电子质量 $m_e$	$9.10938215\times 10^{-31}\text{kg}$	$9.10938215\times 10^{-28}\text{g}$
基本电荷 $e$	$1.602176487\times 10^{-19}\text{C}$	$4.80320427\times 10^{-10}\text{esu}$
玻尔半径 $a_B=\hbar^2/m_e e^2$	$0.52917720859\times 10^{-10}\text{m}$	$0.52917720859\times 10^{-8}\text{cm}$
玻尔磁子 $\mu_B=eh/2m_e c$	$9.27400915\times 10^{-24}\text{J}/\text{T}$	$5.7883817555\times 10^{-5}\text{eV}/\text{T}$
里德伯单位 $Ry=2\pi^2 m_e^4/h^2$	$2.17987197\times 10^{-18}\text{J}$	$13.60569193\text{eV}$
理想气体常数 $R=N_A k_B$	$8.314472\text{J}/\text{mol}/\text{K}$	$8.314472\times 10^7\text{erg}/\text{mol}/\text{K}$
磁通量子 $\Phi_0=hc/2e$	$2.067833667\times 10^{-15}\text{Wb}$	$2.067833667\times 10^{-7}\text{M}$
核磁子 $\mu_n=eh/2m_n c$	$5.05078324\times 10^{-27}\text{J}/\text{T}$	$3.15245123\times 10^{-8}\text{eV}/\text{T}$

# 第 1 版序

20 世纪 40 年代 Seitz 出版了“现代固体理论”(F. Seitz: “The Modern Theory of Solids”)这本书,开始在大学里设立固体物理这门课程。20 世纪 50 年代初,黄昆教授在北京大学,程开甲教授在南京大学率先在我国的大学物理专业本科开设固体物理课程。近五十年过去了,现在我国不仅是物理类专业,而且电子学、材料科学类等许多专业都开设了这门课程。最根本的原因,是这门课程涉及的内容,在当代科学技术中太重要了,如果没有这些学科领域的发展,近七十年来人类社会经历的空前重大的科技进步是完全不可能的。现在,不仅是物理学工作者,许多部门的科技工作者都把固体物理这门课程涉及的内容作为必备的基础知识。

近几十年,固体物理这门学科也有很大的发展。从学科的对象来说,已经从主要是围绕具有晶体构造的固体扩展到包括无序体系、非晶态、液晶态、液态、高分子……,以至多种物相构成的更复杂的系统。所以,从 20 世纪 70 年代开始,在学术刊物上逐渐用“凝聚态物理”这个名词代替“固体物理”来概括物理学中这个领域。但是,毫无疑问,原来用固体物理概括的这部分内容仍是凝聚态物理的主体。对大多数科技人员说,固体物理这部分内容作为基础知识来要求是更为恰当的。从学科发展来说,这部分内容也继续是一些当前十分热门、正在不断出现新的进展的领域。

韦丹教授本人曾经在微磁学、计算磁学上做过深入的研究工作,对固体物理的工业应用有所体会,这几年又一直在清华大学工作,这本书是她在材料、电子系任教时使用的教材基础上编著的。内容上注意反映最新的学科发展和当前应用科学的需要,同时也比较充分地考虑了打好基础,以便学生具有将来进一步学习和发展的要求;叙述上尽可能简明扼要,突出物理概念和物理图像,不过多停留在数学推导;的确,这是一本较好的固体物理教材。对要学习固体物理这门课程的大学生和研究生,对在在工作中感到要了解固体物理知识的各类专业的科技工作者,这本书会是很有用的。



北京大学物理学院  
2002 年 11 月

# 第 1 版前言

从 1997 年开始,作者在清华大学材料系、电子系教授固体物理课。1997 年春夏,花了半年时间写了最初的手稿,那只是类似讲课提纲的文本。此后几乎每年都讲固体物理课,每年增加些内容,同时对讲义做修改。现在有了电子文本以后,修改还是比较方便的——除了有一次丢失了最重要的固体电子理论一章的电子文件,只能把所有公式重新敲了一次。

写这本《固体物理》的初衷,是我在美国读凝聚态物理理论的博士时候,发现以前在国内学习的固体物理知识有时候用不上。在那里,凝聚态方面的教授经常挂在嘴边的一些名词,比如说“中子衍射”为何物,我根本就没有概念。究其然,是因为原来国内物理学的本科高年级课程着重理论的讲述,而没有把某个物理理论与相关实验手段、实验验证结合起来讲。

所以,在写讲稿之初,我就注意把固体物理的传统理论,和历史上对固体物理学的发展有重要作用的物理思想和相关实验结合起来讲。这些实验和理论结合,对凝聚态物理、电子学、材料学、衍射学的学科发展,甚至对整个信息电子类器件工业的发展,都有重要的作用。

在结合理论和实验讲述的过程中,我受到工作所在的清华大学材料系的学术影响,从原来注重晶格结构、晶体电性质的固体物理学讲授方法,转向更全面的对固体的理解:包括对电磁声光热等各项固体基本性质的第一性原理解释,也包括对有序固体和无序固体结构的全面理解。这里我要感谢我的同事袁俊教授和章晓中教授,与他们的讨论使我获益良多。

从 2001 年秋天起,承蒙清华大学出版社的宋成斌先生约稿,我开始把我的固体物理讲稿写成正式的书。前后一共写了 8 个月左右。在此成稿的过程中,我注意仔细考察了固体物理整个的体系中每一个重要的理论概念或者是实验的学术源流。这样,写到后来,发现固体物理学的建立,与原子物理、量子论、量子力学、量子统计、固体电子学的建立都有密切不可分割的关系,这也正是 20 世纪物理学大发展的一个缩影。由此我想到,原来把各门物理学课程严格分割,不讲述相互之间关系的教学体系,是有问题的,学生无法体会到整个物理学的理论、实验、对自然界规律的理解、工业应用都是处在相关的体系中,而这正是对物理学能有比较全面的理解和把握的关键。



最后,我想感谢我的丈夫刘川。没有他的影响,我想我今日对物理学的兴趣不会达到这样的程度,也许做一个信息电子工业的工程师就很满足了。这本书是对凝聚态物理、材料学、半导体学等感兴趣的学生写的,也是为他写的。

韦 丹

清华大学材料科学与工程系

2002年9月23日

# 前 言

在本书第1版出版后近3年,应清华大学出版社之邀,本书将出第2版。根据读者的反馈,以及我自己在教学中的经验教训,书中有不少细节的地方叙述过简,初学者很不容易把握,因此还有待加强和改善。

恰巧通过清华出版社的推荐,美国的 Thomson Learning 出版社有意出版本书的英文版。本书第2版的中文版于是就与英文版一起进行写作和修改,这样可以起到互相校正的作用。

本书第2版与第1版比较,课程的大框架没有变。但是,叙述细节以及图片有大量的增加。例如,我在重写第2章的时候,发现哈特里-福克方程与化学键的物理解释关系密切,因此必须结合哈特里-福克理论才能正确分析各种化学键结合能的量子力学来源。又比如说,在第5章中,我发现在量子化学和计算材料学中常用的能带计算方法,必须建立在密度泛函理论的基础上;因此在讨论真实能带之前,初步介绍密度泛函理论及相关的算法就是必要的。再比如说,我发现第1版的书中原来提及的很多理论和实验是获得过诺贝尔奖的,只不过我原来没有查阅资料,忽略过去了,在第2版中,希望能更好地体现这些思想的精彩之处。

本书的写作目的是阐述固体物理诸多分支中共有的哲学基础。固体物理及其拓展的凝聚态物理,在所有的物理学知识中占有相当的比例。物理学在从宏观到微观的所有尺度上都获得了巨大的成功,固体物理学与其他物理学分支一样,都是奠基于伟大学者提出的激动人心的思想;只不过固体物理学着重研究  $10^{-10} \sim 10^{-2}$  m 这个重要区间内的固体的结构、电磁声光热等基本原理。显然,这个区间恰好是现代高科技工业、特别是电子工业的尺度区间。因此,固体物理学不仅是微观和宏观世界之间的桥梁,也是自然科学和现代工程学科之间的重要桥梁之一。

感谢清华大学出版社和 Thomson Learning 出版社的编辑,没有他们的鼓励,珠玉在前,我真的没有勇气来完成一本英文教材,并对中文原版做大幅度的修改。本书第2版相关的教学参考和习题解答也将由清华大学出版社出版,希望对新接触固体物理课的读者有所帮助。

最后我还要感谢在固体物理方面教育和影响过我的老师们,包括北京大学物理学院的秦国刚院士,他教过我本科的固体物理课程;还有美国加州大学(University of California at San Diego, UCSD)物理系我的导师 Daniel P. Arovas

教授、Robert C. Dynes 教授、Lu J. Sham 教授、Jorge Hirsch 教授、Harry Suhl 教授;还有本系的朱静院士和柳百新院士在研究的着眼点方面对我的影响。他们的教育和知识对我的影响是无法估价的。

韦 丹

清华大学材料科学与工程系

2007年6月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 古希腊的原子论 .....	1
1.2 固体物理的发展史 .....	4
1.3 自然界中的固体及固体物理学 .....	7
本章小结 .....	10
本章参考文献 .....	10
<b>第 2 章 化学键和晶体形成</b> .....	11
2.1 原子的量子模型 .....	12
2.2 离子键和离子晶体 .....	15
2.3 共价键和共价晶体 .....	19
2.4 金属键和典型金属 .....	23
2.5 原子和分子固体 .....	25
本章小结 .....	29
本章参考文献 .....	30
本章习题 .....	30
<b>第 3 章 固体结构</b> .....	32
3.1 晶体的几何描述 .....	32
3.2 对称性与晶格结构的分类 .....	36
3.2.1 对称性与二维布拉菲点阵的分类 .....	37
3.2.2 点群与三维布拉菲点阵的分类 .....	39
3.3 晶体的自然结构 .....	43
3.3.1 元素晶体的结构 .....	43
3.3.2 化合物的结构：泡林规则 .....	47
3.4 倒易点阵和布里渊区 .....	51
3.4.1 倒易点阵 .....	51
3.4.2 布里渊区 .....	53

3.5	衍射与晶体结构的测定	56
3.5.1	X射线衍射、电子衍射和中子衍射	58
3.5.2	衍射理论	65
3.6	无序固体结构	71
3.6.1	非晶体	73
3.6.2	准晶体	75
3.6.3	液晶	78
	本章小结	85
	本章参考文献	86
	本章习题	87
<b>第4章</b>	<b>晶格振动和固体热性质</b>	<b>89</b>
4.1	爱因斯坦声子模型	91
4.2	德拜声子模型	94
4.3	晶格动力学和中子衍射	98
4.3.1	晶格动力学	98
4.3.2	光学支和声学支	101
4.3.3	声子能谱的中子衍射测定	105
	本章小结	108
	本章参考文献	109
	本章习题	109
<b>第5章</b>	<b>固体电子理论</b>	<b>111</b>
5.1	德鲁德模型:自由电子气体	113
5.2	索末菲模型:自由电子费密气体	117
5.2.1	电子的比热容	121
5.2.2	电导率和热导率	123
5.2.3	电子从金属表面的热发射	125
5.2.4	霍尔效应	127
5.3	能带理论	129
5.3.1	布洛赫定理	130
5.3.2	紧束缚模型	132
5.3.3	弱晶格势近似	136
5.3.4	密度泛函理论与能带计算法的介绍	139
5.3.5	真实能带和费密面	141

5.3.6 半经典模型和有效质量·····	146
本章小结·····	149
本章参考文献·····	149
本章习题·····	151
<b>第 6 章 固体的电性质：输运过程</b> ·····	154
6.1 导体·····	155
6.2 半导体·····	159
6.2.1 半导体的特性·····	161
6.2.2 载流子浓度和迁移率·····	167
6.2.3 半导体器件的基本概念·····	179
6.3 超导体·····	189
6.3.1 超导体的特性·····	191
6.3.2 唯象理论·····	194
6.3.3 微观 BCS 理论·····	199
本章小结·····	202
本章参考文献·····	202
本章习题·····	204
<b>第 7 章 固体的磁性</b> ·····	207
7.1 磁性的量子力学根源·····	210
7.1.1 单原子近似：原子磁矩·····	211
7.1.2 自由电子近似：朗道能级·····	214
7.2 磁性的类别·····	217
7.2.1 抗磁性·····	217
7.2.2 顺磁性·····	219
7.2.3 铁磁性·····	225
7.2.4 反铁磁性和亚铁磁性·····	230
7.3 自旋与基本粒子的相互作用·····	233
7.3.1 中子磁性衍射和磁结构·····	233
7.3.2 自旋波与中子非弹性散射·····	235
7.3.3 电子自旋共振和核磁共振·····	239
本章小结·····	242
本章参考文献·····	243
本章习题·····	245

<b>第8章 固体的介电性质和光学性质</b> .....	247
8.1 固体的光性质、电性质和磁性质的统一 .....	249
8.2 洛伦兹光学模型和电极化过程 .....	251
8.2.1 德鲁德金属光学模型 .....	256
8.3 激光: 爱因斯坦的受激辐射理论 .....	258
8.3.1 辐射的量子力学理论 .....	258
8.3.2 微波激光器 and 激光器 .....	260
本章小结 .....	263
本章参考文献 .....	264
本章习题 .....	265
<b>索引</b> .....	266

# 第 1 章 绪 论

## 本章提要

- 原子论的历史(1.1)
- 固体物理发展史(1.2)
- 本书的结构和内容(1.3)

固体物理的基础是晶体的原子结构和电子结构。人类在自然哲学和科学中对宇宙结构和物质结构的探索可以说是源远流长,而古希腊的原子论(atomism)正是在物质结构探索方面闪耀的第一道光。西方人一般认为,是公元前 600 年古希腊的一个城邦米利都(Miletus)的泰勒斯(Thales)第一个提出了“万物是由什么构成的?”这个哲学问题。米利都是小亚细亚最重要的希腊城邦之一。小亚细亚(Asia Minor)是欧洲人对地中海东北海岸的古称,现在属于土耳其。希腊本土在公元前 1000 年左右被当时还是野蛮人的多立克人征服,很多有知识的希腊人逃到了小亚细亚,因此小亚细亚是希腊文明的重要中心之一。著名的希腊文化的源头《荷马史诗》就是在小亚细亚写成的。

## 1.1 古希腊的原子论

“万物是由什么构成的?”这个问题的提出,标志着人类自然哲学思考的开始。从此以后,为了回答这个问题,各个时代、各个民族的无数有智慧的人思考并给出了自己的答案。希腊人在接受了迦太基人发明的字母文字以后,语言可以分解为二十多个字母,这影响了他们的思考方式,他们总是希望探索到能“拼写”出自然界的基本元素。当时泰勒斯(见图 1.1)对“万物是由什么构成的?”这个问题的答案是很简单的。泰勒斯居住在地中海之滨,每天都可以看到云气从海面上升起,于是他回答说:“万物都是由水聚散而成的。水蒸腾就是空气,空气凝结为水和各种固体,所以万物的本质是水。”

在泰勒斯之后,古希腊诸城邦(见图 1.2)的哲学家对这个问题给出过各种各



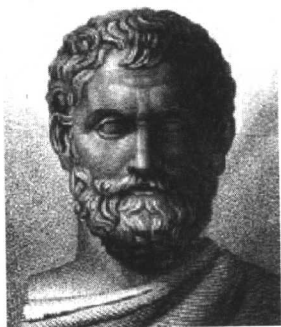


图 1.1 哲学家泰勒斯(Thales of Miletus, 624BC—547BC)

样的答案。比如, 米利都的阿那克西曼德(Anaximander of Miletus, 610BC—546BC)说: “万物是由无限的原始物质构成的”; 米利都的阿那克西美尼(Anaximenes of Miletus, 610BC—546BC)说: “万物的本质是空气。”公元前 510 年, 古希腊文化进入黄金全盛期。居住在小亚细亚以弗所的赫拉克里特(Heraclitus of Ephesus, 540BC—480BC)曾提出过对立统一的概念以及“人不能两次跨入同一条河流”的哲言, 他认为: “万物的本源是火。火与其他物类的混合物, 一般都以我们可以感知气味的其他物类来命名。但是火本身是不变的要素。”哲学家、诗人、材料专家、毕达哥拉斯学派的捐款人埃姆毕多克拉斯(Empedocles of Akragas, 492BC—432BC)住在西西里岛上的希腊城市阿克拉格斯, 他总结了前人对物质结构的哲学观念以后, 提出了古希腊最流行的四元素说: “万物由水、气、火、土组成”(罗素, 1992)。



图 1.2 古希腊: 米利都(Miletus)、以弗所(Ephesus)、萨摩斯(Samos)和雅典(Athen)

在古代中国, 商周之交的古书《洪范》中第一次提出五行说, 认为“宇宙是由金、木、水、火、土五种元素构成的”。不过, 中国哲学对宇宙的看法远不止此, 还常用阴阳八卦学说来解释自然界的万千变化。中国文字不是拼音文字, 文字元素有很多, 因此像五行说这样以几个简单元素解释世界的思想方法不占主导地位。

公元前 450 年, 居住在意大利的希腊殖民城市埃利亚的哲学家巴门尼德(Parmenides of Elea)提出了著名的巴门尼德球以解释宇宙: “宇宙中只有一个永恒不变的存在, 像一个充实的球, 空白不能存在, 因为‘有’不能是‘无’”。这个著名