

(美) 施 敏 著

半 导 体 器 件

物 理 与 工 艺

微电子学系列

科 学 出 版 社

半 导 体 器 件

物 理 与 工 艺

〔美〕施 敏 著

王阳元 嵇光大 卢文豪 译

曾令社 校

科 学 出 版 社

1 9 9 2

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书介绍了半导体器件物理与制造工程的最新进展,是半导体器件物理与工艺方面的入门教材。全书共十二章,可分为三个部分。第一、二章描述了半导体的基本性质及导电过程,重点介绍硅与砷化镓;第三章至第七章从构成大多数半导体器件的基本结构——p-n 结开始,介绍了双极、单极、微波、光电器件的物理及特性;第八章至第十二章阐述了单晶生长、氧化、薄膜淀积、扩散、离子注入、光刻等器件制造(特别是集成电路制造)的主要工艺步骤的理论与实践。

本书可作为高等院校半导体、微电子学、电子工程、应用物理专业师生的教学参考书,也可供相应领域从事实际工作的科研人员、工程技术人员参考。

S. M. Sze

SEMICONDUCTOR DEVICES

Physics and Technology

John Wiley & Sons, 1985

半 导 体 器 件

物 理 与 工 艺

[美] 施 敏 著

王阳元 嵇光大 卢文豪 译

曾令社 校

责任编辑:魏 玲

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100707

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1992 年 5 月第 一 版 开本:850×1168 1/32
1992 年 5 月第一次印刷 印张:18 1/2
印数:1—1400 字数:489 000

ISBN 7-03-002620-9/TN·113

定 价: 18.90 元

译 者 序

在半导体发展历史上，作为晶体管诞生地的贝尔实验室的科学家们，为半导体器件技术的发展，曾经作出过，而且仍在不断地作出杰出的贡献。施敏博士作为这个集体中的一员，凭藉这块丰腴的土壤，以其较高的学术造诣，相当长时间以来一直耕耘在撰写教科书的园地上，并取得了丰硕的成果。他所编写的《半导体器件物理 (The Physics of Semiconductor Devices)》一书早在 60 年代初就受到中国同行和青年学生的欢迎并享有盛誉。近年来，由他主编的，由贝尔实验室的众多科学家参加撰写的《超大规模集成电路技术(VLSI Technology)》也已被介绍到中国，并被译成中文*。《半导体器件——物理与工艺 (Semiconductor Devices, Physics and Technology)》这本书则是将器件物理和工艺二者结合在一起，包含了上述两本书的基本内容。它不仅适用于做大学本科生和研究生的教材，而且书中简明的物理描述和丰富的数据，对在半导体器件和微电子领域从事实际工作的工程师和科学家们来说，也不失为一本十分有用的参考书。

我的两位同学，中国科学院微电子中心的卢文豪研究员和北京市半导体器件二厂的嵇光大高级工程师萌发了翻译该书的愿望。1987 年和 1988 年我访问美国时，有机会与施敏博士探讨了这个问题。施敏博士听了之后十分高兴，并衷心希望中译本能早日出版。回来以后不久，卢文豪研究员和嵇光大高级工程师就按照约定分别译出了全书的有关章节。我的任务就是把他们的译稿集成起来，但近些年来，由于事务性工作实在太多，身不由己，不可避免地影响了这本书的出版过程。幸好得到了北京工业大学

* 章定康等译，科学出版社，1987 年出版。

曾令祉教授的帮助，他以认真负责的精神审阅并校订了全书的译稿，使这本译作得以尽快与读者见面，我们谨向他表示深深的谢意。

90年代是我国经济建设的重要历史时期。在90年代初，我们谨以此译作奉献给学习和工作在半导体器件和微电子领域的广大年轻朋友和同行们，愿它能为年轻朋友的成长和同行们在为祖国微电子科学事业的发展而奋斗的过程中助一臂之力。这样，我的两位同窗挚友的心愿也就得到了慰藉。

据我所知，施敏博士最近已把相当多的精力放在台湾的微电子科学技术和教育事业上。我想本书的出版也可以认为是90年代海峡两岸学者学术交流的一个浪花，愿海峡两岸的科学家和工程师有更多的交流。记得我在美国“硅谷”工作的时候，不少朋友都这样说，半导体器件和微电子这一“硅文化”也是“筷子文化”。毫无异议，我们中国人在这方面有着特长，愿海峡两岸的学者和工程技术人员共同为中华民族在世界的进一步崛起而携手合作。

最后我要特别感谢北京大学物理系虞丽生教授、微电子学研究所韩汝琦教授，以及中国科学院半导体研究所的梁俊吾研究员、杜宝勋研究员，上海冶金研究所的罗腾蛟研究员和北京师范大学的张通和教授，他们在百忙之中审阅了部分译稿，并提出了许多宝贵的意见。我也要感谢北京大学微电子学研究所的同事们对我的帮助和支持，特别是我的研究生张旭光，为使本书尽快出版，他从终稿的审核、数以百计的图表的校对到索引的编译等等做了大量的工作。在这里，我代表我的两位同窗向他们致以衷心的感谢。

王阳元

1991年1月9日于北京大学

• • •

序

这是一本关于半导体器件及其制造工艺的入门教材，旨在作为应用物理、电气工程和材料科学专业大学生的课本，亦可作为从事实际工作的工程师和科学家们的参考书，为他们提供器件及工艺方面的最新发展。

书中内容分为三部分。第一部分为第一、二章，描述了半导体的基本性质及导电过程，特别着重讨论了两种最重要的半导体：硅和砷化镓。第二部分为第三章到第七章，讨论了半导体器件的物理及特性。首先介绍构成大多数半导体器件的基本结构，即 p-n 结，接着讨论双极和单极器件，然后又涉及了特殊的微波和光电器件。第三部分为第八章到第十二章，阐述了从晶体生长到光刻等一系列制造工艺。介绍了器件制造，特别是集成电路制造的主要工艺步骤的理论和实践。虽然本书每一章大都是相对独立的，但作者仍建议教员按照从第一章到第十二章的内容顺序使用本书，以便保持逻辑连贯性。每章末的习题是该章内容延续的不可分割的部分。

本书的撰写工作得到了众多人士的协助。首先我要深深感谢 AT&T 贝尔实验室为支持这项工作所作的安排。承蒙以下参加审阅的诸位博士提出了有益的建议，使我获益匪浅：贝尔实验室的 A. C. Adams 博士，J. Agraz-Guerena 博士，J.R. Brews 博士，J. H. Bruning 博士，D.I. Caplan 博士，A. Y. Cho 博士，C.M. Drum 博士，W. Fichtner 博士，D. B. Fraser 博士，W. D. Johnston 博士，L.E. Katz 博士，T.P. Lee 博士，M.P. Lepselter 博士，S. Luryi 博士，W.T. Lynch 博士，D.A. McGills 博士，C. J. Mogab 博士，K. K. Ng 博士，M.B. Panish 博士，L. C. Parrillo 博士，C. W. Pearce 博士，T. P. Pearsall 博士，T. E.

Seidel 博士, T.T. Sheng 博士, G. E. Smith 博士, G. W. Taylor 博士 和 J.C.C. Tsai 博士; Cheng Kung 大学的 C.Y. Chang 教授, 南加利福尼亚大学的 C. R. Crowell 教授, 瑞士联邦工业学院的 H. Melchior 教授和维也纳技术大学的 H.W. Thim 教授.

作者对 E. Labate 先生的文献查阅工作, 对 N. Erdos 先生、J.A. Foley 先生、P.F. Foley 女士、W.M. Heskes 先生、A. C. Johnson 女士和 N. J. Miller 女士的手稿技术编辑工作, 对 J. Maye 女士、J. T. McCarthy 女士、A. M. McDonough 女士以及教材出版中心的人员打印本书的终稿, 均表谢意. 并感谢 R. T. Anderson 先生和绘图部的人员绘制了本书的数百幅技术插图. 尽管所有插图都已改进并重新绘制, 但凡引于它处的插图均已征得版权所有者的同意, 对此我仍深表谢意.

我愿感谢 John Wiley & Sons 的 M. G. Floyd 先生和 G. V. Novotny 先生对本书撰写工作的鼓励. 我还要感谢 Bradford 大学的博士研究生 Ranjit S. Mand 对于书中内容的改进及例题的解答所作的贡献. 最后, 我要感谢我的夫人和孩子对我多方面的帮助, 包括为我打印全部初稿, 以及准备插图、索引和附录.

施敏

1985 年 1 月于新泽西

Murray Hill

目 录

第一章 能带与载流子浓度	1
1.1 半导体材料	1
1.2 晶体结构	3
1.3 价键	8
1.4 能带	10
1.5 态密度	16
1.6 本征载流子浓度	17
1.7 施主与受主	22
习题.....	30
参考文献.....	31
第二章 载流子输运现象	32
2.1 载流子漂移	32
2.2 载流子扩散	43
2.3 载流子注入	46
2.4 产生与复合过程	47
2.5 连续性方程	60
2.6 强电场效应	66
习题.....	72
参考文献.....	73
第三章 p-n 结	75
3.1 热平衡状态	76
3.2 耗尽区	81
3.3 耗尽层电容	89
3.4 伏-安特性.....	94
3.5 电荷存贮和瞬态特性	105
3.6 结的击穿	108
习题.....	115

参考文献.....	117
第四章 双极型器件	118
4.1 晶体管的作用原理	119
4.2 双极型晶体管的静态特性	125
4.3 双极型晶体管的频率响应和开关特性	143
4.4 异质结双极型晶体管	157
4.5 可控硅器件	160
习题.....	171
参考文献.....	172
第五章 单极型器件	173
5.1 金属-半导体接触.....	174
5.2 结型场效应晶体管	187
5.3 金属-半导体场效应晶体管.....	198
5.4 MOS 二极管.....	203
5.5 MOS 场效应晶体管: 基本特性.....	219
5.6 MOS 场效应晶体管: 阈值电压和器件尺寸比例.....	230
习题.....	241
参考文献.....	242
第六章 微波器件	244
6.1 隧道二极管	245
6.2 碰撞电离雪崩渡越时间二极管	251
6.3 势垒注入传输时间二极管	258
6.4 转移电子器件	261
6.5 各种微波器件的比较	271
习题.....	275
参考文献.....	277
第七章 光电子器件	278
7.1 辐射跃迁和光吸收	278
7.2 发光二极管	285
7.3 半导体激光器	295
7.4 光电探测器	308
7.5 太阳能电池	319

习题	330
参考文献	331
第八章 晶体生长与外延	333
8.1 从熔体中生长单晶	334
8.2 悬浮区熔法	344
8.3 硅片成形与材料特性表征	348
8.4 气相外延	354
8.5 液相外延	364
8.6 分子束外延	368
习题	374
参考文献	375
第九章 氧化与薄膜淀积	377
9.1 热氧化	378
9.2 介质淀积	392
9.3 多晶硅淀积	401
9.4 金属化	403
习题	418
参考文献	419
第十章 扩散与离子注入	421
10.1 基本扩散理论与实践	422
10.2 非本征扩散	432
10.3 与扩散有关的工艺	441
10.4 注入离子的分布与射程	447
10.5 无序与退火	459
10.6 与离子注入有关的几个工艺	464
习题	470
参考文献	471
第十一章 光刻——图形曝光与刻蚀	474
11.1 光学图形曝光	474
11.2 电子束、X 线及离子束图形曝光	490
11.3 湿法化学腐蚀	501
11.4 干法腐蚀	508

习题	516
参考文献	518
第十二章 集成器件	520
12.1 无源元件	522
12.2 双极工艺	525
12.3 MOS 场效应晶体管工艺	534
12.4 MES 场效应晶体管工艺	552
12.5 集成器件的基本极限	556
习题	561
参考文献	562
附录	564
A. 符号表	564
B. 国际单位制	566
C. 用于构成十进倍数和分数单位的词头	567
D. 希腊字母表	567
E. 物理常数	568
F. 300 K 时主要半导体材料的性质	569
索引	570

第一章 能带与载流子浓度

本章将讨论半导体的一些基本性质。首先讨论晶体结构，即有关半导体中的原子排列问题。然后提出价键与能带的概念，这与半导体的导电性质有关。最后讨论热平衡下的载流子浓度。在本书以后各章中均将用到这些概念。

1.1 半导体材料

固体材料可分为三大类：绝缘体、半导体和导体。图 1.1 列出了它们中的一些重要材料的电导率 σ (及相应的电阻率 $\rho, \rho \equiv 1/\sigma$)¹⁾。绝缘体，例如熔凝石英、玻璃，其电导率很低，约为 10^{-18} —

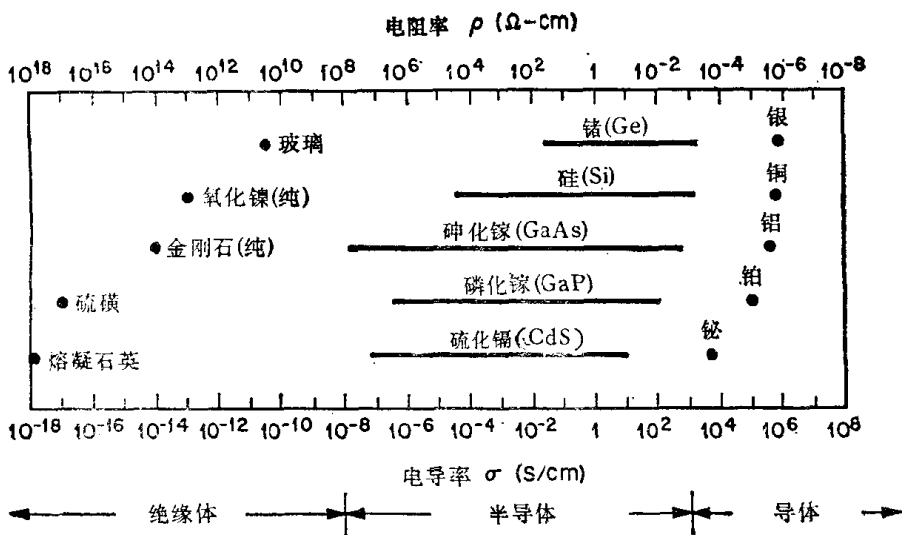


图 1.1 绝缘体、半导体、导体电导率的典型范围

1) 参见附录 A 的符号表。

10^{-8}S/cm . 导体, 例如铝、银, 电导率很高, 典型值为 10^4-10^6S/cm^D . 半导体的电导率介于绝缘体和导体之间. 一般说来, 半导体的电导率对温度、光照、磁场以及微量杂质原子都很敏感. 电导率的这种敏感性使半导体成为电子应用领域中最重要的材料之一.

半导体材料的研究始于 19 世纪初^[1]. 许多年来, 已经对很多半导体进行了研究. 表 1.1 给出了周期表中与半导体有关的部分. 由一单原子组成的元素半导体, 如硅、锗等, 位于周期表的第 IV 族. 而大量的化合物半导体则是由两种或两种以上元素构成的. 例

表 1.1 周期表中与半导体有关的部分

周期	II 族	III 族	IV 族	V 族	VI 族
2		B 硼	C 碳	N 氮	
3	Mg 镁	Al 铝	Si 硅	P 磷	S 硫
4	Zn 锌	Ga 镓	Ge 锗	As 砷	Se 硒
5	Cd 镉	In 铟	Sn 锡	Sb 锑	Te 碲
6	Hg 汞		Pb 铅		

表 1.2 元素半导体与化合物半导体

元素	IV-IV 族 化合物	III-V 族 化合物	II-VI 族 化合物	IV-VI 族 化合物
Si	SiC	AlAs	CdS	PbS
Ge		AlSb	CdSe	PbTe
		BN	CdTe	
		GaAs	ZnS	
		GaP	ZnSe	
		GaSb	ZnTe	
		InAs		
		InP		
		InSb		

1) 附录 B 给出了国际单位制单位.

如,砷化镓 (GaAs) 是 III-V 族化合物,它们由 III 族元素镓(Ga) 与 V 族元素砷 (As) 构成。表 1.2 列出了一些元素半导体与化合物半导体。

1947 年发明双极型晶体管以前,半导体只应用于各种整流器和光敏二极管之类的两端器件中。50 年代初,锗是主要的半导体材料。但由于在不太高的温度下,锗器件漏电流就较大,因此在许多场合下就显得不适用。此外,氧化锗可溶于水,也不利于器件制造。而硅器件的漏电流低得多,用热生长的方法就能得到高质量的二氧化硅。因此,从 60 年代初开始,硅实际上已有效地取代锗,成为制造半导体器件的材料。之所以这样,还有经济上的原因。硅的电子级材料的价格,比其它半导体材料都便宜得多。以硅石和硅酸盐形式存在的硅占地壳的 25%。是含量仅次于氧的最丰富的元素。目前,它是周期表中被研究得最充分的元素之一。硅工艺也是目前所有半导体工艺中最先进的工艺。

许多化合物半导体具有比硅优越的电学和光学性质,这些化合物半导体 (尤其是 GaAs), 主要用于微波和光电子方面。虽然我们对化合物半导体工艺的了解不如硅工艺那样清楚,但是化合物半导体工艺部分地随硅工艺的发展而发展。本书主要论述硅和砷化镓器件物理和制造工艺。

1.2 晶体结构

我们研究的半导体材料,是原子在三维空间中周期性地排列的单晶,晶体中原子的周期性排列称为晶格。在晶体中,原子不会偏离固有位置太远,而以这个位置为中心作热振动。对一种给定的半导体材料,整个晶格可以用一个元胞来描述。在晶体中重复这个元胞,就能形成整个晶格。

一些基本立方晶体的元胞示于图 1.2。图 1.2 (a) 表示简单立方晶格,立方体的每个顶点上有一个原子,有六个距离相等的最近邻原子,距离 a 称为晶格常数。只有钋晶体具有简单立方晶格。图

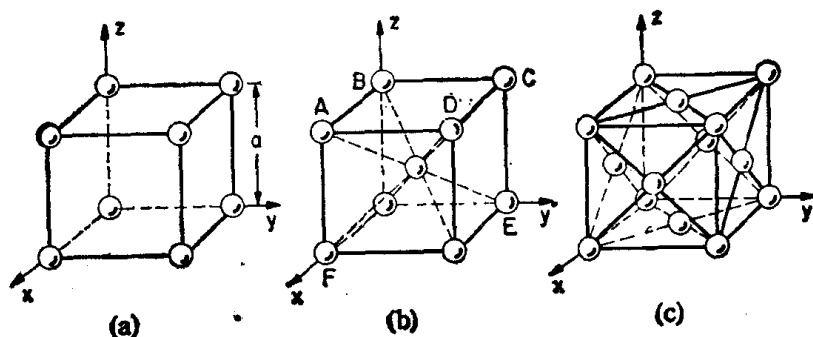


图 1.2 三种立方晶体原胞。(a) 简单立方；(b) 体心立方；
(c) 面心立方

1.2(b) 表示体心立方晶格 (bcc), 除八个顶点有原子外, 立方体中心有一个原子. 在 bcc 晶格中, 每个原子有八个最近邻原子. 钠和钨的晶体具有 bcc 晶格. 图 1.2 (c) 表示面心立方晶格 (fcc), 除立方体八个顶点有原子外, 立方体六个面的中心还各有一个原子. 在 fcc 晶格中, 每个原子有 12 个最近邻原子. 很多元素晶体 (如铝、铜、金、铂等) 具有 fcc 晶格形式.

例题 若在体心立方晶格的体心和立方体各顶点处堆放硬球, 并设体心原子处的硬球和立方体各顶点处的硬球刚好相碰, 求硬球所占体积与元胞体积之比.

解: 每个 bcc 元胞顶点的硬球为邻近八个元胞所共有, 因此元胞的每个顶点包含 $1/8$ 个硬球, 每个元胞共有八个顶点, 因而顶点部分合计为一个硬球体积. 此外, 每个元胞有一个体心硬球. 因此,

$$\text{每个元胞所含硬球数} = 1(\text{顶点部分}) + 1(\text{体心部分}) = 2$$

$$\text{最近邻的距离 [沿图 1.2 (b) 对角线 } AE \text{ 方向]} = \frac{\sqrt{3}}{2} a$$

$$\text{每个硬球的半径} = \frac{\sqrt{3}}{4} a$$

$$\text{每个硬球的体积} = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{\sqrt{3}}{4} a \right)^3 = \frac{\sqrt{3} \pi a^3}{16}$$

硬球所占体积与元胞体积之比的最大值

$$\begin{aligned} &= \frac{\text{元胞所含硬球数} \times \text{每个球的体积}}{\text{元胞的体积}} = \frac{2 \pi a^3 \sqrt{3} / 16}{a^3} \\ &= \frac{\pi \sqrt{3}}{8} = 0.68 \end{aligned}$$

即硬球占 bcc 元胞体积的 68%，其余 32% 的体积是空的。 ■

元素半导体硅和锗具有金刚石晶格结构。如图 1.3 (a) 所示, 这种结构也属于立方晶系, 并可看成是由两个面心立方子晶格相互嵌套而成, 其中一个子晶格沿立方体对角线位移四分之一对角线长度 (即位移 $a\sqrt{3}/4$)。在金刚石晶格中, 所有原子都是相同的, 每个原子周围有四个等距离的最近邻原子, 它们位于一个四面体的顶点 [在图 1.3 (a) 中用粗黑线条所连接的那些小球]。大多数 III-V 族化合物半导体 (例如 GaAs) 属于闪锌矿晶格, 如图 1.3 (b) 所示。闪锌矿晶格和金刚石晶格相比较, 除去其中一个面心立方子晶格由 III 族元素 (Ga) 组成, 而另一个子晶格由 V 族元素 (As) 所组成外, 二者是相同的。在附录 F 中列出了重要半导体材料的晶格常数和其特性。

例题 300 K 时硅的晶格常数为 5.43 \AA , 请计算每立方厘米体积内硅的原子数以及室温下硅的密度。

解: 每个元胞有 8 个硅原子, 因此有

$$\frac{8}{a^3} = \frac{8}{(5.43 \times 10^{-8})^3} = 5 \times 10^{22} \text{ [原子数/cm}^3\text{]}$$

$$\begin{aligned} \text{密度} &= \frac{\text{原子数/cm}^3 \times \text{原子重量}}{\text{阿伏伽德罗常数}} \\ &= \frac{5 \times 10^{22} \text{ 原子/cm}^3 \times 28.09 \text{ g/mol}}{6.02 \times 10^{23} \text{ 原子/mol}} \\ &= 2.33 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

在图 1.2(b) 中可以看到, ABCD 面内有四个原子, 而 ACEF

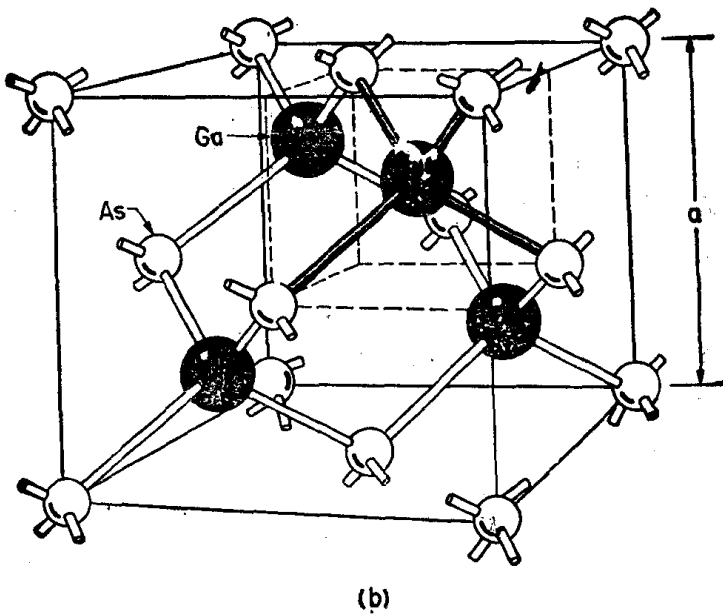
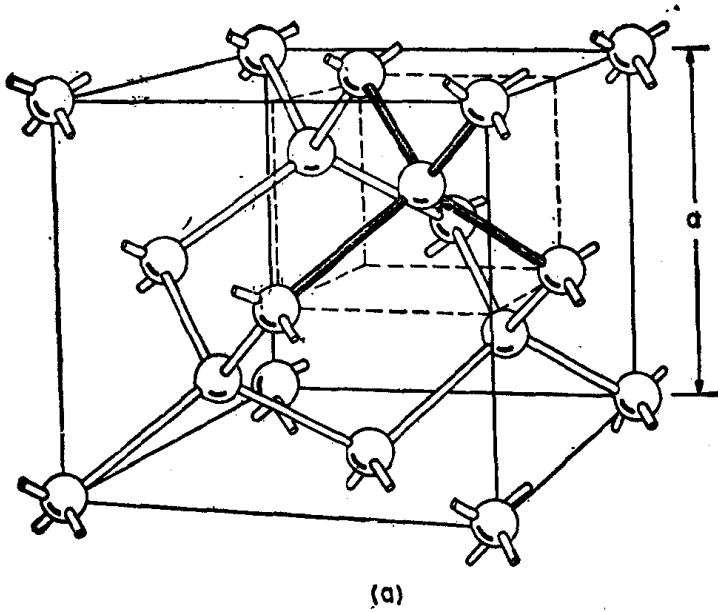


图 1.3 (a) 金刚石晶格结构; (b) 闪锌矿晶格结构

面内有五个原子(四个原子在顶角上,一个原子在中央),两个晶面内的原子间距是不相同的。因此沿不同晶面,晶体性质也不同。器