

压力传感器的设计

制造与应用

孙以材 刘玉岭 孟庆浩 编著

冶金工业出版社

0
河北省教育委员会学术著作出版基金资助

压力传感器的 设计、制造与应用

孙以材 刘玉岭 孟庆浩 编著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2000

内 容 简 介

本书分三大部分。第一部分介绍压阻型压力传感器的原理、弹性力学应力计算及芯片版图设计,并简要的讨论了晶体的能带结构及物理性质。第二部分以生产实践为主,介绍从硅片制备、半导体工艺、微机械加工到芯片封接与引线。第三部分既介绍压力传感器的技术特性、选用及各种热漂移补偿技术、信号调理电路,又以足够的篇幅介绍微型单片机原理及压力传感器在实际领域中的应用和其他种类的压力传感器。

本书适用于从事压力传感器研究和生产的工程技术人员阅读,也可供大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

压力传感器的设计、制造与应用/孙以材等编著. —北京:冶金工业出版社, 2000. 4

ISBN 7-5024-2400-8

I. 压… II. 孙… III. 压力传感器 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 46681 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 林 聪 美术编辑 李 心 责任校对 朱 翔 责任印制 牛晓波

北京源海印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2000 年 4 月第 1 版, 2000 年 4 月第 1 次印刷

850mm × 1168mm 1/32; 19.625 印张; 524 千字; 615 页; 1 - 2000 册

40.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64013877

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

绪 言

传感器是非电量转化为电量测量的元、器件。经典电学测量技术已十分成熟,不仅灵敏度高($1 \times 10^{-12} \text{ V}$, $1 \times 10^{-17} \text{ A}$, $1 \times 10^{-10} \Omega$, $1 \times 10^{-17} \text{ F}$, $1 \times 10^{-16} \text{ C}$),而且精度高、重复性好,数字化、智能化技术得到广泛的应用。这为传感器的发展提供了坚实的基础。现代测量涉及到众多物理量,例如重量、力和力矩、加速度、压力、流量等力学量,温度、热量等热学量,以及气体、液体的成分、浓度等化学量,还有生物、医学、环保等方面量的测量都需要用传感器来完成。另外,计算机和自动化技术的发展和應用也需要用传感器来获取各种信息,方可对其进行处理、传输和通讯,进而进行控制。从生产过程的控制到现代文明生活的家用电器都离不开传感器。世界发达国家已将传感器列为 21 世纪的核心技术,优先研究、开发和应用。

压力传感器是传感器中最成熟的技术。就市场销售额来说,居传感器之首。其年增长率达 20%,具有广阔的应用前景。国外的压力传感器已系列化和标准化。压力范围从 0.069 kPa 至 69 MPa ,精度达 $(1 \sim 5) \times 10^{-4} \text{ FS}$,年稳定度 $1 \times 10^{-3} \text{ FS}$,重复性 $5 \times 10^{-5} \text{ FS}$,滞后 $1 \times 10^{-5} \text{ FS}$,温度误差 $2 \times 10^{-6} \text{ FS}$ 。过压保护范围大于传感器的量程 20 倍以上。使用温度范围为 $-273 \sim 1000^\circ \text{C}$ 。我国压力传感器的性能在 90 年代已有较大的提高。非线性、重复性优于 $5 \times 10^{-4} \text{ FS}$,多晶硅—蓝宝石压力传感器的工作温度可以达到 $-50 \sim 300^\circ \text{C}$ 。但与国外传感器相比,据称科研水平落后 5 ~ 10 年,生产技术水平落后 10 ~ 20 年。而且产量低、品种不全,尚未形成系列化、标准化,不能满足国内市场需求。

今后的发展方向是采用 CAD、CAM、CAT、微机械加工和集成化技术,使压力传感器小型化、集成化、智能化、系列化、标准化,并

大力开展可靠性研究。

可见,21 世纪,我国的压力传感器事业面临挑战和发展机遇并存的严峻局面。需要从事本事业的同仁携手发扬协作精神,努力赶超世界先进水平。

十余年来本书作者先后完成压阻型、电容型压力传感器、智能化压力传感器,PTC 热敏电阻的制备与应用,硅芯片的低温玻封,硅铝硅及硅-硅直接键合、压力传感器零点输出信号电漂移与电阻非线性、硅片抛光技术与抛光液、硅外延自补偿技术、微区薄层电阻测试探针技术等由国家自然科学基金支持的项目及省市科研项目共 30 项。其中获国家发明奖 5 项,省市发明奖 2 项,省市科技进步奖 19 项。并在国内外重要刊物上发表论文 70~80 篇。这些成果都有机地溶入本书各章节中。因此本书不仅是作者的理论成果也是多年实践的结晶。

本书的撰著受到河北省教委的极大关注和鼓励,并给予资助出版,作者在此谨表衷心感谢。并希望本书能在 21 世纪初为我国的传感器事业发挥作用。

全书共十五章。第五、六章由博士生导师、有突出贡献中青年专家刘玉岭教授撰著。第十二、十三章由孟庆浩博士撰写。其余十一章由博士生导师孙以材教授撰写。全书的写作得到河北工业大学领导、电气信息学院领导和校科研处的关怀和指导,本书曾经范兆书、尹志华教授校对,以及沈今楷、孙新宇、高振斌同志等校对。作者对此表示谢意。

书中引用了国内外专家的著作和论文,既丰富了本书的内容,又增添了光彩,作者在此表示谢意。

压力传感器的制造与应用涉及许多方面。由于我们的设备和工艺条件所限,也存在实践不足的地方。因而许多方面也显得文字浅薄,内容不够周全,甚至有偏误之处。谨请有关专家、学者、工程技术人员批评指正。

作 者

1999 年 1 月

目 录

第一章 晶体及其能带结构	(1)
第一节 空间点阵和晶体结构	(1)
第二节 晶体的能带结构	(11)
第三节 晶体的物理常数及其坐标变换	(21)
参考文献	(30)
第二章 压力传感器的基本原理	(31)
第一节 单晶硅的压阻效应	(31)
第二节 扩散硅的压阻效应	(44)
第三节 多晶硅的压阻效应	(55)
附录 任意晶向压阻系数的计算	(67)
参考文献	(70)
第三章 压力传感器中承压弹性膜的应力计算	(71)
第一节 弹性力学基础	(71)
第二节 承压弹性薄膜的应力分析	(78)
第三节 压力传感器弹性膜二维有限元法的应力计算	(86)
第四节 压力传感器三维有限元法应力计算简介.....	(103)
参考文献	(113)
第四章 压力传感器芯片版图设计.....	(114)
第一节 合理利用压阻系数.....	(115)

第二节	力敏电阻条的设计	(123)
第三节	二极管与三极管的设计	(130)
第四节	失效与可靠性问题	(137)
	参考文献	(142)
第五章	压力传感器的衬底制备	(144)
第一节	硅单晶片抛光的基本原理	(144)
第二节	衬底片的清洗	(152)
第三节	外延工艺原理	(165)
第四节	硅—硅键合工艺原理	(175)
	参考文献	(181)
第六章	压力传感器的管芯制备	(183)
第一节	氧化膜的制备	(183)
第二节	扩散工艺原理	(203)
第三节	光刻工艺原理	(234)
	参考文献	(249)
第七章	硅压力传感器的微机械加工	(251)
第一节	概况	(251)
第二节	湿化学腐蚀	(252)
第三节	各向异性腐蚀过程计算机模拟	(267)
第四节	压力传感器的压力腔腐蚀工艺	(275)
第五节	表面微机械加工——牺牲层技术	(286)
第六节	玻璃穿孔技术	(288)
	参考文献	(289)
第八章	压力传感器的封装	(291)
第一节	压力传感器的封装意义及要求	(291)
第二节	压力传感器芯片的封接方法	(293)

第三节	硅片与硅片低温直接键合·····	(304)
第四节	封接材料的性质·····	(308)
参考文献	·····	(310)
第九章	压力传感器的引线·····	(312)
第一节	压力传感器的引线键合·····	(312)
第二节	载带自动键合(TAB)技术·····	(316)
第三节	引线的可键合性与可靠性·····	(326)
第四节	引线间接触电阻的测量·····	(333)
参考文献	·····	(338)
第十章	压力传感器的技术性能与选用·····	(339)
第一节	压力传感器的技术性能·····	(339)
第二节	压力传感器的选用·····	(355)
参考文献	·····	(365)
第十一章	压力传感器的热漂移及其补偿技术·····	(366)
第一节	热零点漂移及其补偿技术·····	(366)
第二节	热灵敏度漂移及其补偿技术·····	(382)
第三节	用自平衡电桥简单电路消除热零点和灵敏度 漂移·····	(389)
参考文献	·····	(401)
第十二章	压力传感器的信号调理·····	(402)
第一节	集成运算放大器简介·····	(402)
第二节	仪表放大器简介·····	(425)
第三节	压力传感器激励·····	(432)
参考文献	·····	(439)

第十三章 压力传感器的智能化技术····· (440)

第一节	MCS-51 单片机系统概述 ·····	(440)
第二节	MCS-51 单片机的指令系统 ·····	(448)
第三节	MCS-51 单片机内部存储器 ·····	(470)
第四节	MCS-51 单片机内部的定时器/计数器 ·····	(475)
第五节	MCS-51 单片机内部的并行输入/输出(I/O)口 ·····	(481)
第六节	MCS-51 单片机内部的串行口 ·····	(485)
第七节	MCS-51 单片机的中断控制系统 ·····	(490)
第八节	智能化压力传感器的硬件设计·····	(498)
第九节	智能化压力传感器的软件设计·····	(523)
	参考文献·····	(539)

第十四章 其他种类压力传感器····· (541)

第一节	膜片式电容型压力传感器·····	(541)
第二节	压电型压力传感器·····	(549)
第三节	金属电阻应变式压力传感器·····	(565)
第四节	干涉光非接触式读出压力传感器·····	(572)
第五节	光纤压力传感器·····	(578)
	参考文献·····	(583)

第十五章 压力传感器的应用····· (584)

第一节	压力传感器的应用分类·····	(584)
第二节	LED 显示排压力计 ·····	(590)
第三节	电池供电精密气压计·····	(594)
第四节	压力控制器·····	(598)
第五节	自动洗衣机中应用的压力传感器·····	(602)
第六节	自动补偿静压的压力传感器·····	(604)
第七节	压力传感器在液位测量中的应用·····	(607)

参考文献.....	(611)
-----------	-------

附 录

一、主要物理常数	(611)
二、单位换算表	(612)
1. 长度单位换算	(612)
2. 质量单位换算	(612)
3. 力单位换算	(612)
4. 功及能量单位换算	(612)
5. 功率单位换算	(612)
6. 压力单位换算	(613)
7. 电磁单位换算	(614)
三、重要半导体的物理性质	(614)

第一章 晶体及其能带结构

第一节 空间点阵和晶体结构

一、原胞、单胞、晶系

晶体是由原子、离子或分子依靠其间的键合力在空间有规则且周期性排列而构成的。在外形上表现出一定的规则几何形状。

例如如图 1-1 所示原子的周期性排列构成了一个二维空间点阵。一般情况下空间点阵点并不代表原子、离子或分子本身,而是其重心,称为结点。如果细心选择出一个最小空间点阵单元并把它们相互紧挨堆积,就可以复制出整个空间点阵的话,则这样的单元被称为固体物理学原胞(以下简称原胞)。

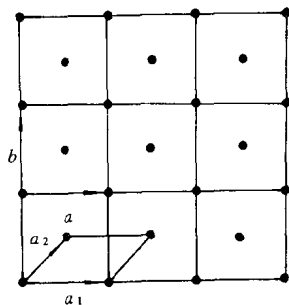


图 1-1 空间点阵及其两种重复单元

在某一特定方向上,点阵的排列有一个最小的周期,称为原胞的基矢,如图 1-1 中的 a_1 、 a_2 。三维空间点阵的原胞的基矢用 a_1 、 a_2 、 a_3 表示。

实际晶体的外形或就其空间点阵来说,往往具有明显的对称性,而原胞往往不能全面反映晶体空间点阵的对称性。为此又选择比原胞大几倍、不仅要求反映空间点阵周期性,并要求能够反映晶体所具有的全部对称性的单元,称为结晶学单胞(以下简称单胞)。同样,将单胞一个紧挨一个排列堆积,也可以构成整个晶体的空间点阵。单胞在三个方向上的边长用单胞的基矢 a 、 b 、 c 表示。通常称基矢的长度为点阵常数。图 1-1 中二维单胞的基矢为

a 、 b 。从结晶学角度研究晶体的话,只需要研究一个单胞便可以了。

通常,通过空间点阵结点作一系列重要直线,将空间点阵划分成网格。这种网格被称为晶格。因此点阵常数又被称为晶格常数。

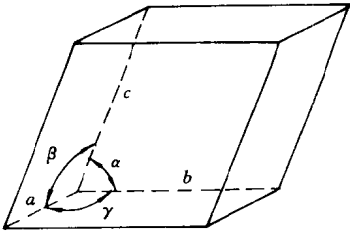


图 1-2 单胞三个晶轴间夹角及晶格常数

图 1-2 示出一个一般的三维单胞,单胞三个方向上的边构成晶轴。这样可用晶轴方向上的晶格常数 a 、 b 、 c 及晶轴之间的三个夹角 α 、 β 、 γ 来表示单胞的几何特征。依据 a 、 b 、 c 及 α 、 β 、 γ 之间的不同关系,可以将自然界的晶体归纳为七大晶系,如表 1-1 所示。人们又把晶格分为简单格子和复式格子。当每个格点周围的情况完全等同时为简单格子,又被称为布喇菲(Bravais)格子。当每个格点周围的情况不尽相同时被称为复式格子。复式格子可由布喇菲格子套构而成。在立方晶系中有三种布喇菲单胞,即简单立方、体心立方和面心立方结构,如图 1-3 所示。

表 1-1 七大晶系中单胞的特征

三斜晶系	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$
单斜晶系	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma$
正交晶系	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
正方(四角)晶系	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
三角晶系	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$
六角晶系	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$
立方晶系	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

压力传感器中通常所用元素半导体晶体硅、锗属于金刚石晶

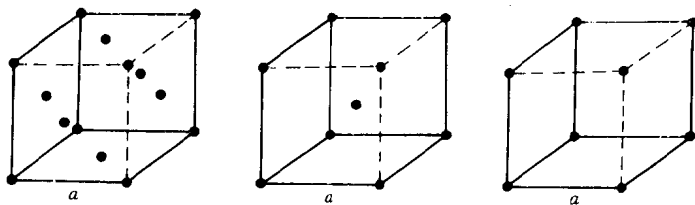


图 1-3 立方晶系中三种布喇菲单胞

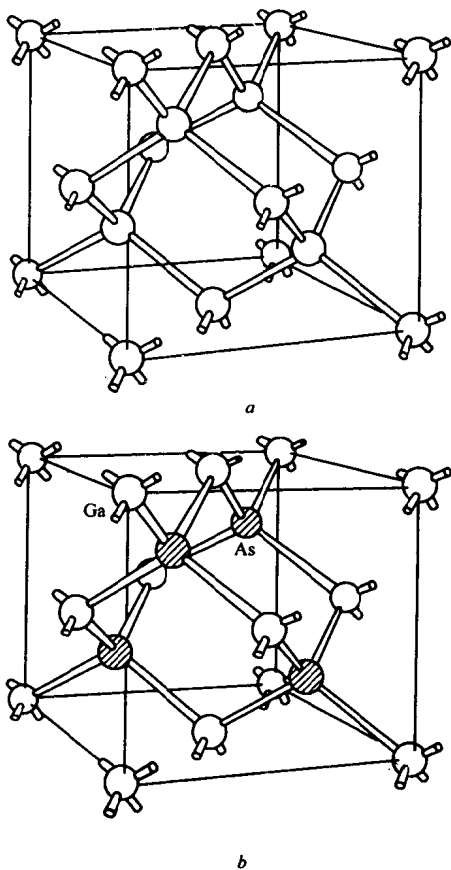


图 1-4 金刚石结构(a)和闪锌矿结构(b)的单胞

体结构,如图 1-4a 所示。砷化镓是重要的化合物半导体,属于闪锌矿结构,如图 1-4b 所示。它们都是复式格子。金刚石结构可以看成是两套面心立方晶格套构而成。其间沿单胞的体对角线位移其 $1/4$ 长度。闪锌矿结构可以看成是,把金刚石结构中的一套晶格上的碳原子换成锌原子,另一套晶格上的碳原子换成硫原子。

金刚石或硅晶体是碳原子或硅原子依靠共价键结合而成,即每一个碳或硅原子和周围四个原子共价结合,在空间分布形成一个正四面体。由于共价键结合强度高,不易断裂,因此金刚石具有最高的硬度。硅晶体也有很高的强度,其强度要超过不锈钢。表 1-2 示出硅晶体点阵有关参数及力学常数^[1,2]。由于硅有很好的力学性能,是制造压力传感器的良好弹性材料。

表 1-2 硅晶体点阵有关参数及力学性能常数

原子量	28.09
点阵常数	$a = 5.431 \text{ \AA}$
	Si—Si 键长 $2.351 \text{ \AA}$
密度	2.32831 g/cm^3
原子/ cm^3	5.00×10^{22}
硬度(莫氏)	7
熔点	1415°C
杨氏模量	$10.67 \times 10^6 \text{ N/cm}^2$
体模量	$9.788 \times 10^6 \text{ N/cm}^2$
压缩系数	$1.0216 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{N}$
弹性常数(刚度系数)	$C_{11} = 16.58 \sim 16.67 \times 10^6 \text{ N/cm}^2$ 300K
	$C_{12} = 6.38 \sim 6.48 \times 10^6 \text{ N/cm}^2$
	$C_{44} = 7.96 \sim 7.98 \times 10^6 \text{ N/cm}^2$
热膨胀系数	$2.33 \times 10^{-7}/\text{K}$ 300K
断裂强度	$4.5 \times 10^4 \text{ N/cm}^2$
弹性顺服系数	$S_{11} = 7.68 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{N}$
	$S_{12} = -2.14 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{N}$
	$S_{44} = 12.6 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{N}$
热膨胀系数	$2.33 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 300K
泊松比	$\nu = -S_{12}/S_{11} = 0.28$

二、晶向和晶面指数

晶体中原子有规则、周期性的排列,不同方向上便显示出不同的性质。例如单位长度上原子分布密度便不同。这与无序结构物质不同,后者原子杂乱分布,表现各向同性。因此研究晶体时常需要知道特定的方向。首先要规定一个坐标系。它以单胞某一顶点为原点,沿其边长方向为坐标轴,称为主晶轴坐标系。

在图 1-5a 所示立方晶系晶轴坐标系中,从原点(单胞的某一顶点)到某一原子作一矢量 A 。该矢量可用单胞的基矢为单位来表示它沿晶轴的分量:

$$A = Ra + Sb + Tc$$

将 R, S, T 化为互质整数 h, k, l 后,用 $[hkl]$ 表示该矢量所在方向的晶向,称 $[hkl]$ 为晶向指数。例如在图 1-5 中已表示出 $[111]$ 、 $[100]$ 、 $[110]$ 晶向。 $[100]$ 、 $[010]$ 、 $[001]$ 为三个晶轴各自的晶向。

晶体中位于同一平面的原子构成所谓晶面。在立方晶系中凡与 $[hkl]$ 晶向垂直的晶面用 (hkl) 表示该晶面(非立方晶系中晶面另有普适法则定义)。称 hkl 为该晶面的晶面指数,图 1-5b 中示出 (100) 、 (110) 、 (111) 晶面。凡与 $[hkl]$ 性质相同、但取向不同的一系列晶向用 $\langle hkl \rangle$ 表示,属于同一晶向族。又用 $\{hkl\}$ 表示晶体中性质相同但方位不同的一系列晶面,即晶面族的晶面指数。

在立方晶系中,晶面之间的距离 d 为:

$$d = a / \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (1-1)$$

式中 a 为晶格常数。

可以看出,高指数面的面间距小,原子面密度小。 $\{100\}$ 、 $\{110\}$ 、 $\{111\}$ 为重要的低指数面,面间距大,原子面密度大。

面对 $[\bar{1}\bar{1}0]$ 晶向看硅晶体点阵结构,可得到图 1-6 所示的点阵在 $(\bar{1}\bar{1}0)$ 面上的投影。硅原子的正四面体共价键连接清晰可见。四个共价键沿着 $[111]$ 晶向。沿 $[111]$ 、 $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ 晶向的键躺在 $(\bar{1}\bar{1}0)$ 面上,反映真实键长。沿 $[\bar{1}\bar{1}1]$ (前面)和 $[\bar{1}1\bar{1}]$ (后面)的键不躺在 $(\bar{1}\bar{1}0)$ 面上,其投影重合且投影长度短于真实键长。图 1-6 中 $[111]$ 晶向为铅垂方向。可以看出,硅晶体中与 $[111]$ 晶向垂直的

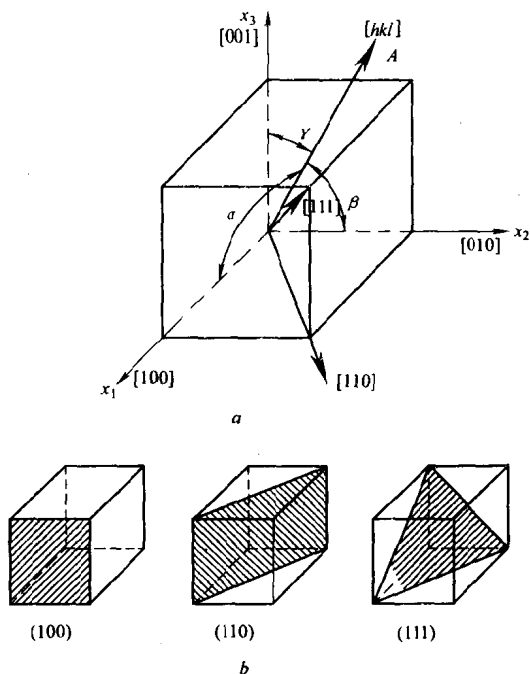


图 1-5 立方晶系中矢量 A 的晶向表示法

a — A 与坐标轴之间的夹角; b —三个重要晶面:(100)(110)(111)

晶面有二组,都是(111)面,因此(111)面是双层结构。大面间距为

$\frac{\sqrt{3}}{4}a$,小面间距为 $\frac{1}{4\sqrt{3}}a$ 。晶面的原子面密度大,则面间距越大,说

明该晶面本身不易断裂。于是晶体断裂时,往往沿面密度大的晶

面解理。解理面上出现未饱和的共价键,称为悬挂键。悬挂键密

度越高,表面的化学活泼性越高。对硅晶体而言,(100)晶面的原

子面密度为 $2/a^2 \cong 6.78 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$,悬挂键密度为 13.56×10^{14}

cm^{-2} 。(110)晶面的原子面密度为 $2\sqrt{2}/a^2 \cong 9.59 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$,悬

挂键密度为 $9.59 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$ 。宽间距(111)面的面密度为 $4/\sqrt{3}a^2$

$\approx 7.83 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$,悬挂键密度为 $7.83 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$ 。窄面间距的

(111)面的面密度为 $8/\sqrt{3}a^2 \approx 15.67 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$ 。因为窄(111)晶

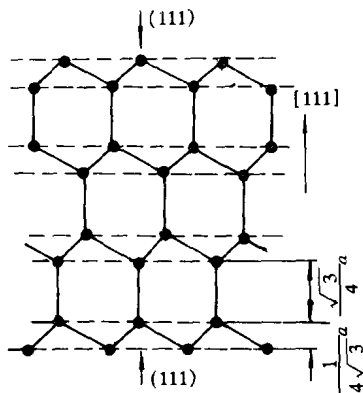


图 1-6 硅点阵在 $(\bar{1}10)$ 面上的投影

面不易解理,通常不去考虑其悬挂键密度。宽 (111) 晶面上的悬挂键密度比 (100) 和 (110) 面的都低,反应活性低,不易被腐蚀。

三、晶向的方向余弦

在立方晶系中,某一晶向与主晶轴 x_1, x_2, x_3 的夹角分别为 α, β, γ , 有

$$l = \cos \alpha, m = \cos \beta, n = \cos \gamma \quad (1-2)$$

称为该晶向的方向余弦。

立方晶系中,对于 $[hkl]$ 晶向来说,在该晶向上总可以选取一矢量 A (图 1-5):

$$A = h i_1 + k i_2 + l i_3 \quad (1-3)$$

这里 i_1, i_2, i_3 为主晶轴上以单胞边长 a 为单位的矢量。矢量 A 的模为 $|A| = \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} a$, 于是立即可得到方向余弦:

$$l = \cos \alpha = \frac{h}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}, m = \cos \beta = \frac{k}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}},$$

$$n = \cos \gamma = \frac{l}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (1-4)$$

这里要注意,不要将方向余弦 l 与晶向指数 l 相混淆。在立方晶系中,不同晶向之间的夹角为