

电子技术培训教材

物理电源

电子元器件专业技术培训教材编写组



电子工业出版社

内 容 简 介

本书由太阳能电池和温差发电器两部分组成。太阳能电池部分较系统地讲述了太阳能电池的工作原理,硅太阳能电池工艺,其它太阳能电池,太阳能电池的测试检验,太阳能电池组合板和电源系统的设计;温差发电器部分较全面系统地讲述了温差发电器的基本原理,温差电材料的理论、工艺和主要参数的测试方法,单体焊接工艺,换能器的结构和组装工艺,各种温差发电器使用的热源及使用中的问题。

本书内容深入浅出,避免繁琐的公式推导,可作为从事物理电源的技术工人培训教材,也适合中专水平的技术人员和管理干部阅读,也可供中专和技校的有关师生参考。

物 理 电 源

电子元器件专业技术培训教材编写组

责任编辑:吴金生

*

电子工业出版社出版发行(北京市万寿路)

山东电子工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/32 印张: 9.75 字数: 217.6千字

1985年4月第1版 1985年4月第1次印刷

印数: 3000册 定价: 1.85元

统一书号: 15290·45

出版说明

为了更好地落实中共中央、国务院《关于加强职工教育工作的决定》，提高电子工业职工技术素质，按照电子工业部的统一分工，参照部颁《电子工业元器件、机电组件、电表专业工人初级技术理论教学计划、教学大纲》，并考虑到企业管理现代化对管理干部的要求，由电子工业部元器件管理局组织有关单位编写了《磁学知识》、《铁氧体工艺》、《永磁合金工艺》、《磁性材料及器件测量》、《实用电子陶瓷》（上、下册）、《电阻器与电位器》、《微电机原理及工艺》（上、下册）、《电声器件》、《电子敏感元件》、《继电器技术基础》、《接插件工艺学》、《电容器》、《压电石英晶体及元器件》、《化学电源》（上、下册）和《物理电源》共十八册专业技术培训统编教材。这套教材可作为电子工业工人的技术培训和管理人员的业务进修用书，也可作为技工学校、职业高中的教材和中等专业学校的参考书。

这套教材由董元昌、王乃增、陈兴信、刘联宝、杨臣华、张熙、池玉清、展发祥、张志远、丁光未、焦桐顺、王志昌等同志组成编委会，负责组稿和技术协调。董元昌同志任主任，王乃增、张志远、丁光未同志任副主任，在编写过程中，我们力求在内容上适合电子工业职工技术培训的需要，文字叙述上简明扼要，通俗易懂。但由于电子元器件和机电组件门类杂，专业多，涉及科学技术知识十分广泛，加之时间仓促，书中难免有不足之处，恳切希望广大读者提出宝贵意见。

《物理电源》由魏彦章同志担任主编。第一篇由包诞文同志编写，李汶滋同志审阅，第二篇由张建中同志编写，季昭南同志审阅。

本书编写过程中得到了不少单位的大力支持，在此表示感谢。

电子工业部元器件工业管理局
技术培训教材编委会
一九八四年三月

目 录

第一篇 太 阳 电 池

第一章 太阳电池概述	(1)
第一节 引言	(1)
第二节 太阳电池的基本结构	(2)
第三节 太阳和太阳辐射	(3)
第二章 半导体物理知识	(8)
第一节 导体、半导体、绝缘体	(8)
第二节 半导体硅的晶体结构和特性	(9)
第三节 能级和能带图	(11)
第四节 禁带、价带和导带	(13)
第五节 本征半导体	(16)
第六节 掺杂半导体和费米能级	(17)
第七节 载流子的产生、复合与寿命	(22)
第八节 载流子的输运	(26)
第九节 p-n 结及其能带图	(31)
第三章 太阳电池的基本原理	(36)
第一节 光电转换的物理过程	(36)
第二节 太阳电池的特性	(42)
第三节 太阳电池的光电转换效率	(50)
第四章 硅太阳电池工艺	(64)
第一节 硅材料	(64)
第二节 硅片的表面制备	(69)
第三节 扩散制结工艺	(76)

第四节	除去背结	(89)
第五节	电极制造	(92)
第六节	腐蚀周边	(111)
第七节	减反射膜的制造	(112)
第五章	其它太阳电池	(128)
第一节	新型硅太阳电池	(128)
第二节	化合物太阳电池	(136)
第三节	非晶硅太阳电池	(142)
第六章	太阳电池测试和质量检验	(146)
第一节	太阳电池效率测量	(146)
第二节	太阳电池其它参数的测量	(151)
第三节	太阳电池的质量检验和质量分析	(153)
第七章	硅太阳电池组合板和电源系统的设计	(157)
第一节	硅太阳电池组合板	(158)
第二节	太阳电池电源系统的设计	(167)

第二篇 温差发电器

第一章	温差发电器概述	(177)
第一节	温差发电器发展简史	(177)
第二节	温差发电器的分类	(178)
第三节	温差发电器的特点	(179)
第四节	温差发电器的应用	(180)
第二章	温差发电器的基本理论	(182)
第一节	温度和热量	(182)
第二节	热传递的方式	(184)
第三节	温差电效应	(189)
第四节	温差发电	(193)
第五节	温差电单体对的伏-安特性曲线和功率	(195)

第六节	最大效率	(196)
第三章	温差电材料	(203)
第一节	温差电材料的选择标准	(203)
第二节	温差电性质	(207)
第三节	重要的温差电材料	(214)
第四节	温差电材料制备工艺	(219)
第五节	温差电材料质量检验	(229)
第四章	单体焊接	(235)
第一节	焊接原理	(235)
第二节	电极	(236)
第三节	焊接接头、模具和夹具	(239)
第四节	焊接前的清洗和处理	(241)
第五节	焊接方法	(244)
第六节	焊接质量的检验	(249)
第五章	温差电换能器	(255)
第一节	换能器的设计	(255)
第二节	换能器的结构	(260)
第三节	换能器结构材料	(261)
第四节	换能器工艺	(267)
第六章	温差发电器系统	(275)
第一节	热源	(275)
第二节	散热问题	(289)
第三节	升压器和功率调节器	(291)
第四节	温差发电器的性能	(294)
第五节	温差发电器的测试	(299)

第一章 太阳电池概述

第一节 引言

太阳电池是把太阳能直接转换成电能的半导体器件。自从1954年人们制得第一个实用的硅太阳电池以来，它已经有了很大发展，现已成为宇宙飞船、人造卫星的主要电源。在地面上，早已用作灯塔、无人气象站、微波中继站、铁路信号设备的电源。近年来，由于新能源的开发，出现了大型硅太阳电池发电站，其输出功率达兆瓦级，能向工业电网输电。

太阳电池的优点是无污染、寿命长、使用维护简便、性能可靠，缺点是成本较高。因此，目前它大多使用在远离电网的地区。制作太阳电池的材料除硅外，还有硫化镉、碲化镉、砷化镓、磷化铟等。目前，有实用价值的主要是单晶硅太阳电池，其次是多晶硅太阳电池；非晶硅太阳电池也已在要求功率为毫瓦级以下的计算器中大量应用。其它材料的太阳电池尚处于实验研究阶段。八十年代初，单晶硅、多晶硅太阳电池已能大量生产，并已建成兆瓦级生产线。

我国太阳电池的研究工作是从1958年开始的。1971年3月，我国发射的第一颗科学实验卫星，成功地使用了硅太阳电池。这标志着我国太阳电池的研究、生产和应用在那时候就已达到一定的水平。此后，又相继使用在航标灯、铁道信号、微波中继站、电围栏等许多方面。由于应用领域的不断

扩大，在七十年代中、后期，出现了一些专业生产工厂。我国太阳电池的质量、产量、应用范围日益得到发展，价格逐渐下降，已初步形成一门不可忽视的新兴工业。

中国太阳能学会于1979年宣告成立，1983年召开了我国第一届光生伏打技术会议，这说明我国太阳能利用进入了一个新的阶段，太阳电池技术达到了一个新的水平。

第二节 太阳电池的基本结构

由于制造太阳电池的基体材料不同，工艺方法不同，所以太阳电池的结构也是多种多样的。现以硅太阳电池为例来介绍太阳电池的基本结构。如图 1-1-1 所示，这是一个 p 型硅材料制成的 n^+/p 型结构的太阳电池。p 层称为基体，厚度为 0.2 至 0.5 毫米。p 层上面是 n 层，它是在同一块材料

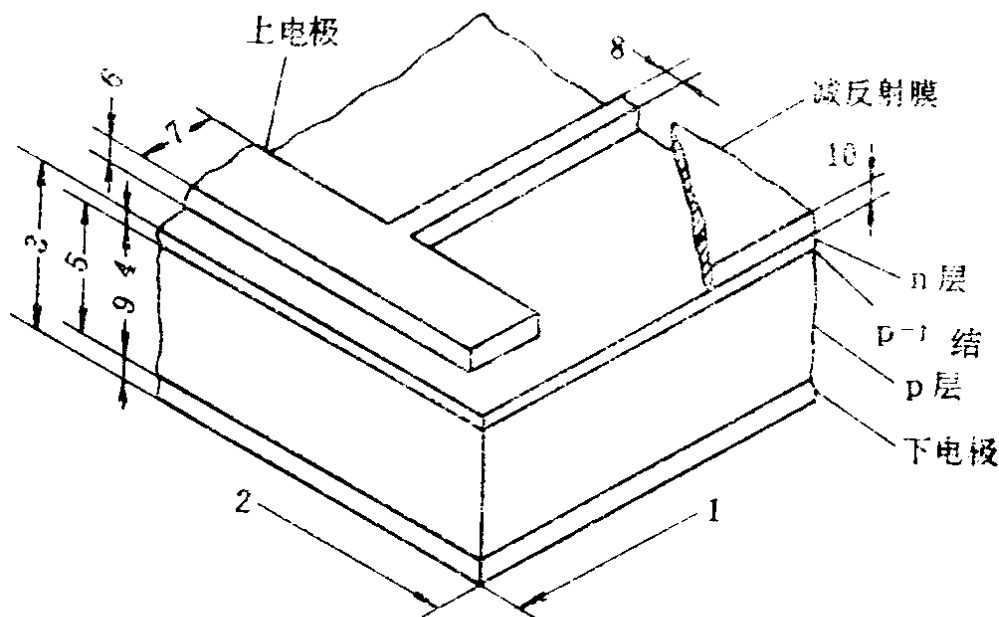


图 1-1-1 太阳电池基本结构局部示意图

1—电池长度；2—电池宽度；3—电池厚度；4—扩散层厚度；
5—基体厚度；6—上电极厚度；7—上电极母线宽度；
8—上电极栅线宽度；9—下电极厚度；10—减反射膜厚度

的表面层用高温掺杂扩散方法制得的，故称为扩散层。由于它通常是重掺杂的，因而也常标记为 n^+ 。 n^+ 层的厚度为 0.2 至 0.5 微米。p 层和 n 层的界面处是 p-n 结。扩散层处于电池的正面，正面就是接受光照的表面，也叫作光照面。扩散层上有与它形成欧姆接触的上电极。上电极由母线和若干条栅线组成。栅线的宽度一般为 0.2 毫米左右。栅线通过母线连接起来，母线宽为 0.5 毫米以上，视电池大小而定。基体下面有与它形成欧姆接触的下电极。电极都由金属材料制成，它们的作用是引出电池产生的电能。在电池的光照面，还有减反射膜，其作用是减少光的反射，使电池接受更多的光。

如果用 n 型硅材料做基体，可以制成 p^+/n 型太阳电池，其结构与 n^+/p 型相仿，只不过基体是 n 型，而扩散层是 p 型。

第三节 太阳和太阳辐射

一、太阳辐射能

太阳是最靠近我们的恒星。它是一个炽热的气态球体，表面温度接近 6000K。其直径为 1.39×10^6 千米，质量为 2×10^{30} 千克，平均密度为 1400 千克/米³。太阳与地球的平均距离为 1.5×10^8 千米；夏至时离地球最远，为 1.52×10^8 千米，冬至时离地球最近，为 1.47×10^8 千米。

原子物理学家把太阳看成是一个巨大的炉子，在炉子中不断进行着热核反应，一些元素变成另一些元素（例如氢变成氦）。这些反应放出巨大的能量，我们将这种能量称为太

阳辐射能。太阳的辐射能相当大，它一秒钟所产生的热能相当于 115 亿吨标准煤燃烧所产生的能量。尽管地球与太阳相距遥远，接收到的太阳能还不到它辐射能量的二十亿分之一，但到达地球陆地上的总能量每年仍有 9.5×10^{17} 千瓦小时，这相当于目前地球上各种能源（水力、火力、原子能电站等）同时所提供的总能量的数万倍。并且，现在太阳中贮存的能量至少还可供它继续发射几十亿年。因此，我们可以说，在人类生活中太阳是“取之不尽，用之不竭”的巨大能源。

二、太阳常数和大气质量

辐射是能量传递的一种形式。它是以电磁波的方式传递的，不需要任何物质作媒介。相反，在传递空间若遇到某种物质，则传递的能量都会由于被吸收、散射和反射而减弱。辐射的传递速度等于光速。

辐射的波长范围很广，从波长 10^{-10} 微米的宇宙线到波长长达几千米的无线电波都是辐射的波长范围（见图1-1-2）。

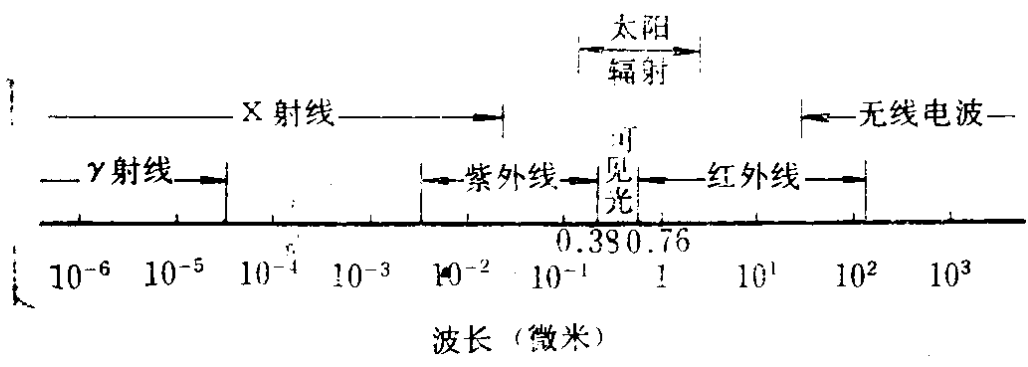


图 1-1-2 各种辐射的波长范围

物体辐射的波长随物体温度而定，温度越高，辐射的短波成分越多。太阳辐射的波长范围很广，但总能量的99%集中在波长0.15~4 微米之间。我们通常说的太阳光就是指它

所含有的各种波长辐射的总称。

以太阳辐射能量强度为纵坐标辐射波长为横坐标所绘制的太阳辐射能量强度随辐射波长变化的曲线叫做太阳光谱曲线。太阳光谱中，各波长的能量很不相同，而且还和地点、时间、当时的气候条件等因素有关。因此，确定太阳光的能量值是很复杂的事情。为了得到计量的参考标准，人们定义了太阳常数这一物理量。

在地球的大气层外，于距太阳的距离为平均日地距离处，太阳在单位时间内投射到垂直于太阳光线方向的单位面积上的全部辐射能称为太阳常数，以瓦/米²表示。换句话说，太阳常数就是大气层外日地平均距离处，垂直于太阳光线的表面上的辐射能通量。

知道太阳常数的数值有很重要的意义。例如，太阳电池在空间应用时，人们必须知道准确的太阳常数才能进行太阳电池方阵的设计。而当已知太阳辐射在大气中的减弱规律时，人们便能由太阳常数找到地面上的太阳辐射值。

1981年10月，世界气象组织仪器和观测方法委员会第八次会议确定太阳常数为 1367 瓦/米²（或1.96卡/厘米²·分）。在此之前，1400和1353瓦/米²这两个数值也曾使用多年。

地面上的情况要比空间复杂得多，因为地面上的任何地方都不可能排除大气的吸收，而大气吸收的状况又与太阳的位置和大气状态有关。为了描述大气吸收对太阳光谱的影响，常利用大气质量的概念。

大气质量为太阳光线通过大气的路程与太阳在天顶（即直射头顶）时太阳光线通过大气的路程之比。例如该比值为1.5时，就称大气质量为1.5，通常写为 AM1.5。

在大气层外，大气质量为零，通常写为 AM0。太阳常

数就是 AM0 条件下的太阳光光强。

在地面上，大气质量越大，对太阳光的吸收越严重，太阳光光强越弱。地面上每平方米可获得的最大光强约 1000 瓦。

大气吸收还能改变太阳光光谱的能量分布，图 1-1-3 给出 AM0 和 AM1.5 的太阳光谱分布。

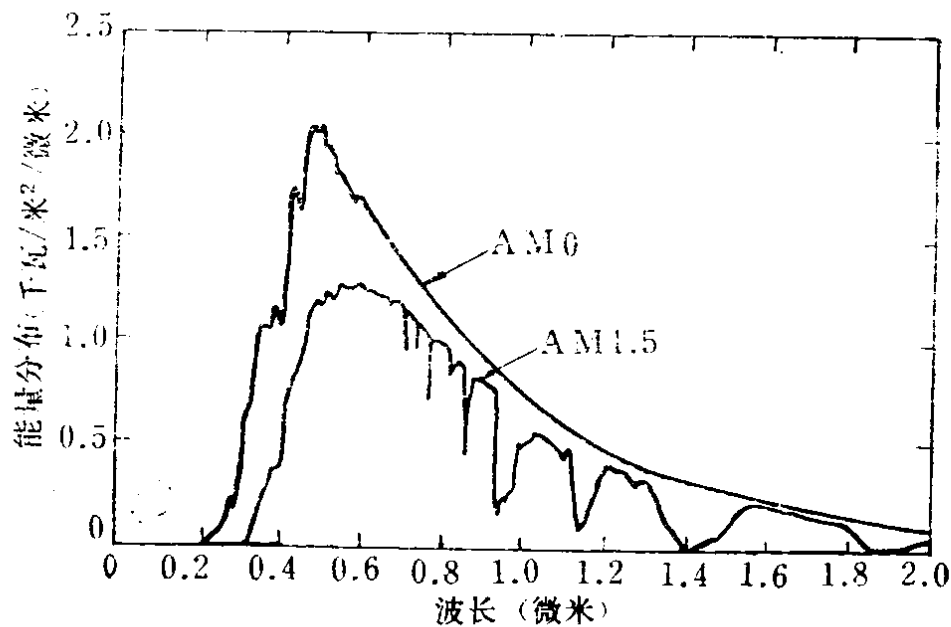


图 1-1-3 AM0和AM1.5的太阳光谱分布

大气对太阳光的吸收除了受大气质量的影响外，还与在大气中漂浮的尘埃、臭氧、水蒸气、二氧化碳、沼气以及人为污染等因素有关。一般在引用 AM1、AM1.5 等条件时，往往假定“标准”量的臭氧吸收和水蒸气吸收。

小 结

(1) 太阳电池已在空间和地面得到了广泛应用。它是把太阳能直接转换成电能的半导体器件。其基本结构是一个大面积的 p-n 结，大多由硅材料制成，在它的正面有栅状的上电极和减反射膜，在背面有下电极。

(2) 太阳能电池依赖太阳光进行工作。太阳以光辐射的形式不停发射出巨大的能量，在地球的大气层外，每平方米可获得1367瓦的太阳辐射能。在地面上，每平方米可获得的最大太阳辐射能为1000瓦左右。

(3) 太阳光光谱的能量分布是很不均匀的，其峰值与大气质量有关。在大气层外，大气质量为零(AM0)，太阳光的能量峰值在0.48微米。大气质量较大时峰值将向长波方向偏移，例如AM1.5的峰值在0.5~0.6微米之间。

思考题

- (1) 利用太阳能电池发电有哪些优缺点？适合哪些地方应用？
- (2) 画出常规硅太阳能电池结构图。
- (3) 什么是太阳常数？它的数值是多少？
- (4) 什么是大气质量？地面上太阳光强与大气质量的关系如何？

第二章 半导体物理知识

第一节 导体、半导体、绝缘体

按导电能力来区分，物质可以分为三类：能够导电，而且在温度变化的情况下，导电能力没有太大的变化，这种物质称为导体，如铜、铝、铁等绝大多数金属及其合金都是导体；不能导电，即使在外界条件影响下也不能导电，或者其导电能力微弱到可以忽略不计，这种物质称为绝缘体，如橡胶、木材、玻璃、塑料等；半导体是指在一定条件下可以导电，导电能力介于导体和绝缘体之间的物质，在外界条件变化时它的导电能力有很大变化，如硅、锗、砷化镓、硫化镉等。

导体、半导体、绝缘体的导电能力不同，是由于它们具有不同的电阻率。它们的电阻率范围大致如表 1-2-1 所示。

表 1-2-1 各种物质的电阻率范围

名 称	电阻率(欧姆·厘米)
导 体	$10^{-6} \sim 10^{-3}$
半 导 体	$10^{-3} \sim 10^8$
绝 缘 体	$10^8 \sim 10^{20}$

半导体要在一定的条件下才能导电，这个条件就是温度或电场。半导体的突出特点是它的导电能力随温度改变有很

大变化。对大多数金属来说，温度上升时，它的电阻率增加。而半导体与此相反，温度升高时，其电阻率降低；温度下降时，其电阻率增大。当温度变化 300°C 时，其电阻率会改变几千倍到几百万倍，温度下降至绝对零度（ -273°C ）时，半导体就成为绝缘体。

半导体的另一个特点是在纯净的半导体材料中加入一些异族元素（称为掺杂）对其导电性质有决定性的影响，从而可以获得各种电阻率及其它性质不同的半导体材料。

半导体通常分为单质和化合物两大类。单质半导体也称元素半导体，如硅、锗、硒等。化合物半导体主要有Ⅲ-V族化合物（如砷化镓）和Ⅱ-VI族化合物（如硫化镉）。此外，还有一些有机化合物半导体。

第二节 半导体硅的晶体结构和特性

硅的原子序为14，它的原子核周围有14个电子。这些电子围绕着原子核按一层层的轨道分布，第一层2个，第二层8个，还剩4个排在第三层，如图1-2-1所示。

硅和其它固体一样，可以分为晶体和非晶体两大类。晶体具有确定的熔点，非晶体则没有确定的熔点，加热时在某一温度范围内逐渐软化（如玻璃、松香等）。

所有的晶体都是由原子、离子或分子在空间按一定规则排列而成。这种对称的、有规则的排

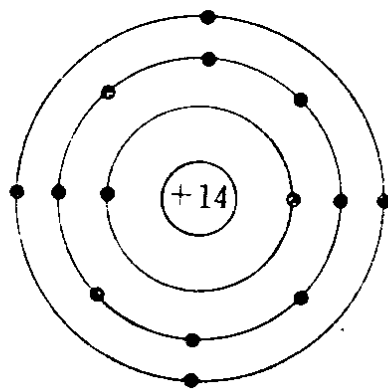


图 1-2-1 硅的原子结构

列叫做晶体的晶格。最小的晶格称为晶胞。晶胞在空间连接起来就构成整个晶体。一块晶体如果从头到尾都按同一种方向重复排列，就称其为单晶体。由许多小颗粒单晶杂乱地排列在一起的固体称为多晶体。非晶体没有上述特征，它只能是“短程有序、长程无序”，这样的非晶体又称为无定形态。

图 1-2-2 是硅的晶胞结构。它可以看作是两个面心立方晶胞沿立方体的空间对角线互相位移了四分之一的空间对角线长度套构而成。这种结构称为金刚石式结构。一个硅原子和四个相邻的硅原子以共价键联结，这四个硅原子恰好在正四面体的四个顶角上，而该原子则处于四面体的中心。

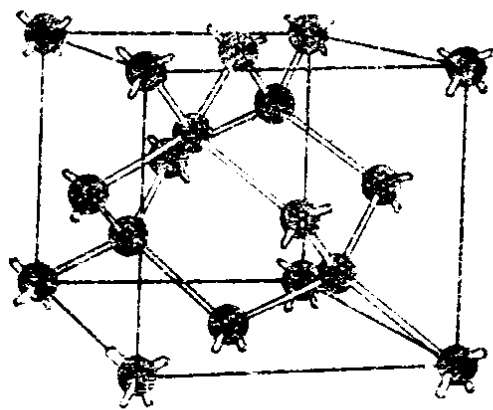


图 1-2-2 晶体硅的金刚石式结构

通过晶格中的硅原子，可以作许多间距相同而互相平行的平面，这些平面称为晶面。垂直于晶面的法线为晶向。具有同一晶向的所有晶面称为晶面族。一块晶体可以划分出很多晶面族。为了区分硅的不同晶面和晶向，利用三个互相垂直的坐标轴，某一晶面在空间的位置用它与这三个坐标轴相截的关系来表示。通常用各轴上截距的倒数（称作晶面指数）来表示。如图 1-2-3 所示，(111) 面指的是晶面与坐标系的三个轴（X、Y、Z 轴）的截距的倒数均为一个周期；(110) 面指晶面与 X、Y 轴的截距的倒数为一个周期，Z 轴为 0 表示它平行于 Z 轴；(100) 面为只截切 X 轴而平行于 Y 轴和 Z 轴的任何平面。我们通常遇到的晶体硅的主要晶面是这三个晶面。