

小型太阳能光伏电源 实用技术

杨志刚 杨 乐 赵 恕 曹鸣雷 王望球◎编著



XIAOXING TAIYANGNENG GUANGFU DIANYUAN
SHIYONG JISHU



KD 科学普及出版社

小型太阳能光伏电源 实用技术

杨志刚 杨 乐 赵 恕 曹鸣雷 王望球 编著

科学普及出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

小型太阳能光伏电源实用技术/杨志刚等编著. —北京:
科学普及出版社, 2008. 9

ISBN 978-7-110-06247-0

I. 小… II. 杨… III. 太阳能电池 IV. TM914.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 127523 号

自 2006 年 4 月起本社图书封面均贴有防伪标志, 未贴防伪标志的为盗版图书。

科学普及出版社出版

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码: 100081

电话: 010-62103210 传真: 010-62183872

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

科学普及出版社发行部发行

北京市迪鑫印刷厂印刷

*

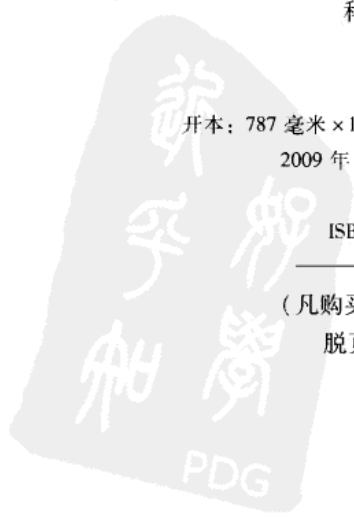
开本: 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张: 6.75 字数: 140 千字

2009 年 1 月第 1 版 2009 年 1 月第 1 次印刷

定价: 18.00 元

ISBN 978-7-110-06247-0/TM·22

(凡购买本社的图书, 如有缺页、倒页、
脱页者, 本社发行部负责调换)



序

自 20 世纪 90 年代初以来，太阳能光伏发电技术及其多种小型发电装置在广袤的中国西部地区逐步得到推广应用，成为无电地区农牧民解决生活和部分生产用电的重要手段，深受当地群众的欢迎，其累计推广量已近百万台。取得了明显的社会效益、环境生态效益和一定的经济效益，对改善西部广大少数民族大众生产生活条件及其未来社会的发展和进步都大有益处。

当前全球石化燃料日渐紧张，价格不断攀升，需求量不断增长；无电和缺电地区对于太阳能发电装置的需求量也不断增长，使得太阳能光伏发电产业在短短的几年内得到了迅猛的发展，年增长率连续几年均保持在 60% 以上。

在西部地区，面对脆弱的生态环境，面对广大西部农牧业地区群众亟须提高社会文明程度和生活水平，大力发展新能源具有重大战略意义。

西部地区经济发展相对较慢，工业基础差，技术进步和技术人才都严重缺乏，面对太阳能光伏电源产品推广量已近百万台的现状，对光伏产品的技术原理、使用方法、维修服务等方面知识进行普及非常必要。

本书作者长期以来在西部地区从事太阳能光伏发电事业，具有丰富的实践经验和扎实的专业基础，积多年的实践经验编纂出版的这本科普读物，较系统地阐述了小型太阳能光伏发电装置的实用技术，可用于技术培训和专业知识的普及，满足西部各省区基层维护人员的技术需求，亦可作为有兴趣学习太阳能光伏发电技术的大、中专学生的参考书。

值得关注的是：本书同时出版藏文版，是国内第一部太阳能光伏发电行业的专业藏语专著，这对于广大西部藏族地区少数民族青年学习必要的太阳能光伏发电技术大有帮助。

朱俊生

2008 年春

编辑委员会

杨志刚	研究员
杨 乐	理学博士
赵 恕	高级工程师
曹鸣雷	高级工程师
王望球	高级工程师

审稿人员

王景宵	教授级高级工程师
吴达成	副研究员
崔容强	教授
叶庆好	教授

前 言

光伏效应是一个通过太阳能电池将光能直接转化为电能的过程。1839 年法国物理学家埃德蒙贝克勒尔发现了光伏效应；1956 年第一块效率为 6% 的硅光电池被创造出来；1958 年太阳能电池被美国用于人造卫星的发射机供电；20 世纪半导体技术的发展和石油危机也使得以硅材料为主的太阳能电池迅速发展。目前实验室中硅材料太阳能电池的效率已经达到 24.7%，与此同时太阳能电池发电的成本也正在不断下降。可以预计光伏发电将成为未来电网发展的主要技术方式之一。依据国际权威机构的预测，到 2020 年全球光伏发电量将占总发电量的 1.1%，到 2040 年将占到总发电量的 21%~26%。

我国是世界上太阳能资源最丰富的国家之一，65% 以上的地区太阳能辐射总量大于 $5000\text{MJ}/\text{m}^2$ 。尤其是中国西部地区及沿海地区，年累计辐射总量在 $6600 \sim 8500\text{MJ}/\text{m}^2$ 之间，因此，我国太阳能的利用前景十分广阔。

提高系统转换效率、降低生产成本是太阳能光电工业和科研界始终追求的目标，这也是太阳能发电技术竞争力的关键。而降低生产成本不仅取决于生产量的增大，同时取决于行业的技术进步以及产品性价比的提高。与此同时，大规模、广泛地在偏远无电地区普及推广太阳能光伏发电必然导致系统维护和技术服务的极大困难，这就要求太阳能光伏户用电源技术知识的普及，本书正是基于此目的撰写的。

据国家发改委、世界银行/全球环境基金组织、中国可再生能源发展项目办公室的权威统计，近 10 年以来，仅在中国西部少数民族地区，太阳能户用光伏电源系统普及量已近 100 万套，约 30MW_p 。然而，未见任何有关太阳能户用电源基本技术的少数民族语言的书籍或教材问世，本书同时出版藏文版，是第一本藏语版的太阳能及系统技术科普教材，这是用少数民族语言文字及汉语言文字双语介绍的一种探索，因为无经验可鉴，书中许多方面仍不能对应翻译，只能给后来者权作铺路之石；欠妥之处敬请读者谅解并补正。

本书是国家发改委、世界银行/全球环境基金组织、中国可再生能源发展项目技术进步项目。

本书由青海天普太阳能科技有限公司、西宁新能源开发有限公司负责编著，书中所涉及的应用电路属编著公司知识产权。

书中所涉及的内容较多，太阳能技术和应用发展迅速，鉴于作者知识水平有限，书中的纰漏，恳请各位读者批评指正。

青海天普太阳能科技有限公司

西宁新能源开发有限公司

2008 年 3 月

责任编辑：张楠 周倩如

责任校对：凌红霞

责任印制：安利平

目 录

第一章 太阳及太阳能概论	1
第一节 太阳	1
第二节 太阳能辐射和吸收	3
第三节 我国太阳能资源分布	5
第二章 太阳能电池	7
第一节 半导体和 PN 结	7
第二节 太阳能电池的种类	11
第三节 太阳能电池结构及工作原理	12
第四节 太阳能电池的基本特性	13
第五节 晶体硅太阳能电池的制造工艺	17
第六节 薄膜太阳能电池制造技术	29
第三章 太阳能电池组件和方阵	33
第一节 太阳能电池组件分类	33
第二节 太阳能电池组件的结构和封装	33
第三节 太阳能电池组件的连接方式	38
第四节 太阳能电池方阵	40
第四章 太阳能电池电源系统	43
第一节 独立光伏系统	43
第二节 并网系统	45
第三节 家用太阳能电源系统	45
第五章 家用太阳能电源系统部件	52
第一节 控制器	52
第二节 直流节能灯具	53
第三节 小功率逆变器简介	61
第六章 蓄电池	67
第一节 概述	67
第二节 铅酸蓄电池电化原理	74
第三节 VRLA 蓄电池生产流程	77
第四节 VRLA 蓄电池的应用、问题及措施	78
第五节 VRLA 电池在太阳能光伏发电领域的应用及维护	79
第七章 太阳能光伏电源系统简易设计	87
附录 我国部分地区日平均日照时数统计表	95
参考文献	100

第一章 太阳及太阳能概论

太阳能是由太阳中的氢经过核聚变而产生的一种能源。太阳表面所释放的能量大致在 $3.8 \times 10^{19} \text{MW}$ ，而地球接受太阳照射 1h 的能量相当于目前世界 1 年的总消耗能量。考虑到太阳的寿命至少还有几十亿年以及其中不含其他有害成分，可以认为太阳能是一种永久、巨大、清洁的绿色能源。合理的利用太阳能，将会是未来解决能源需求、环境污染、人口增加的有效手段。要想合理利用太阳能首先要了解太阳的物理特性、太阳辐射的性质等。

第一节 太 阳

太阳在人类生活中是如此的重要，以致人们一直对它顶礼膜拜。中华民族的先民把自己的祖先炎帝尊为太阳神。印度人认为，当第一道阳光照射到恒河时，世界才开始有了万物。而在希腊神话中，太阳神被称为“阿波罗”。他是天神宙斯（Zeus）的儿子，他高大英俊，多才多艺，同时还是光明之神、医药之神、文艺之神、音乐之神、预言之神。他右手握着七弦琴，左手托着象征太阳的金球。

太阳位于太阳系的中心，是太阳系的中心。太阳的中心温度大约为 $1.4 \times 10^7 \text{K}$ ，表面温度为 5700K ，它是半径为 $6.96 \times 10^5 \text{km}$ 、质量约为 $1.99 \times 10^{30} \text{kg}$ 的恒星。占太阳系总质量的 99.865%，是太阳系所有行星质量总和的 745 倍。表 1-1 简要地介绍了太阳的物理性质。

表 1-1 太阳的物理性质

太阳的物理性质	数 值
太阳直径	$1.39196 \times 10^6 \text{km}$
太阳表面积	$6.093 \times 10^{12} \text{km}^2$
太阳质量	$1.989 \times 10^{30} \text{kg}$
太阳体积	$1.4122 \times 10^{27} \text{m}^3$
太阳平均密度	1.400g/cm^3
表面加速度	$2.7395 \times 10^4 \text{cm/s}^2$
冠温度	$1 \times 10^6 \text{K}$

续表

太阳的物理性质		数 值
光球表面温度（相对于黑体辐射）		5762K
阳光辐射率		$6.5 \times 10^{10} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$
太阳表面抛物线速度		$617 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$
太阳自转周期		24.65d
太阳成分（按重量）	氢	75%
	氦	24.25%
	重元素	0.75%
惯性矩		$6.0 \times 10^{46} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
太阳常数		$(1.95 \pm 0.02) \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$
能量产生率		$3.90 \times 10^{16} \text{ W}$
表面逸出速度		618km/s

太阳是我们唯一能观测到表面细节的恒星。我们直接观测到的是太阳的大气层，它从里向外分为光球、色球和日冕三层。虽然就总体而言，太阳是一个稳定、平衡、发光的气体球，但它的大气层却处于局部的激烈运动之中。如黑子群的出没、日珥的变化、耀斑的爆发等。太阳活动现象的发生与太阳磁场密切相关。太阳周围的空间也充满从太阳喷射出来的剧烈运动着的气体和磁场（图 1-1、图 1-2）。

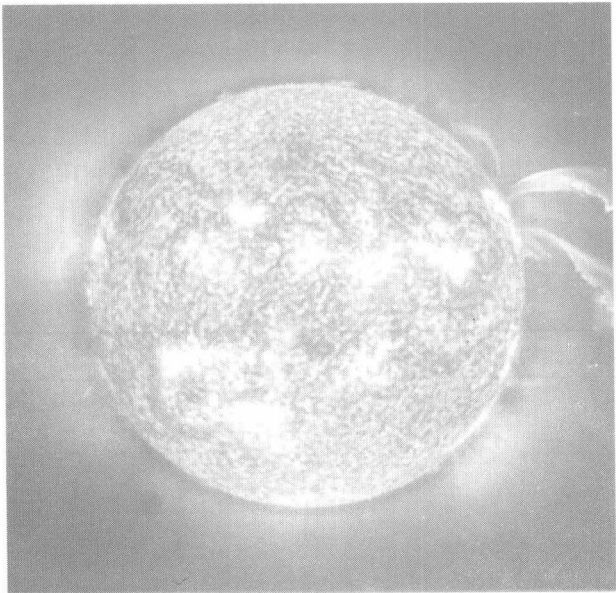


图 1-1 太阳日冕照片

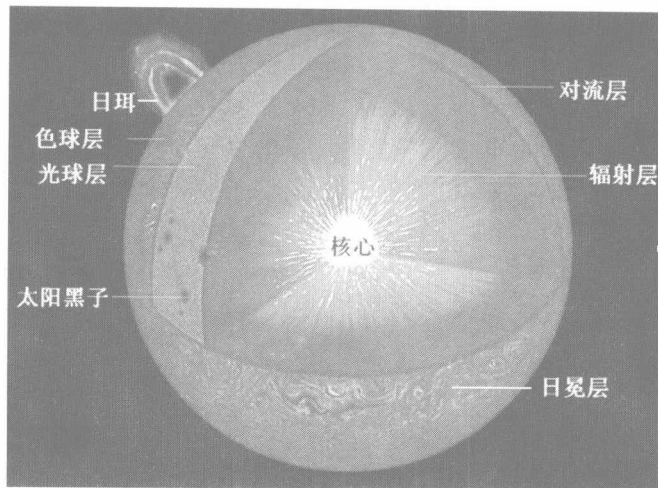


图 1-2 太阳结构图

第二节 太阳能辐射和吸收

太阳光以辐射的方式将能量传输到地球表面，其中一部分光线被反射或者散射，一部分光线被吸收，大约 70% 的光线透过大气层到达地球表面，见图 1-3。太阳光在到达地球平均距离处，垂直于太阳光方向的辐射强度为一常数 $1.367\text{kW}/\text{m}^2$ ，此值称为太阳常数（Solar Constant）。到达地球表面的太阳辐照度与穿透大气层的厚度有关，通过太阳在任何位置与在天顶时，日射通过大气到达观测点的路径比值来描述大气质量，用 AM（Air Mass）来表示。

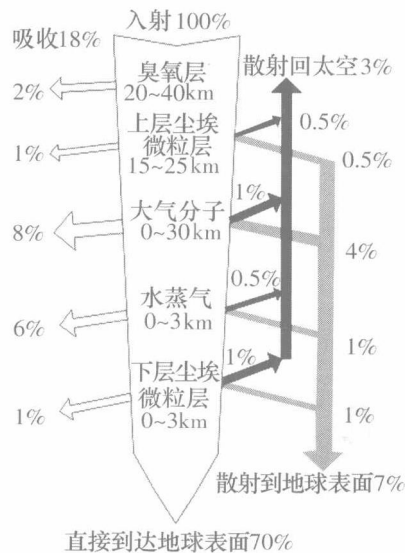


图 1-3 阳光穿过地球大气衰减图

大气质量为零的状态 (AM0), 是指在地球空间外接收太阳光的情况; 太阳与天顶轴重合时, 路程最短, 只通过一个大气层厚度, 太阳光线的实际路程和此最短路程之比为光学大气质量。光学大气质量为 1 (AM=1), 这时的辐射称为大气质量为 1 (AM1) 的辐射。当太阳光线与地面垂直线成一个角度 θ 时 (图 1-4), 大气质量由下式得出: 大气质量 = $1/\cos\theta$ 。估算大气质量的简易方法是测量高度为 h 的竖直物体投射阴影长度 s , 大气质量 = $\sqrt{1 + \left(\frac{s}{h}\right)^2}$ 。

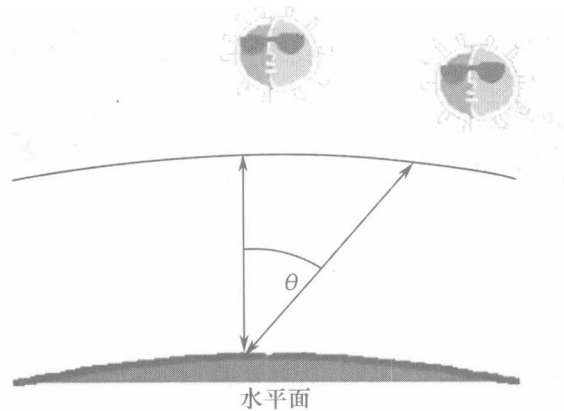


图 1-4 大气质量同照射角度的关系

由于地面阳光的强度和光谱成分变化都很大, 因此为了对不同地点测得的不同太阳能电池的性能进行有意义的比较, 就必须确定一个地面标准, 然后参照这个标准进行测量 [一般采用 AM1.5 的分布, 即总功率密度为 $1\text{kW}/\text{m}^2$ ($100\text{mW}/\text{cm}^2$), 即接近地球表面接收到的功率密度的最大值]。太阳光的波长分布范围 $10\text{pm} \sim 10\text{km}$, 但绝大多数太阳辐射能的波长位于 $0.29 \sim 3.0\mu\text{m}$ 之间, 具体太阳光辐射波长分布如图 1-5。

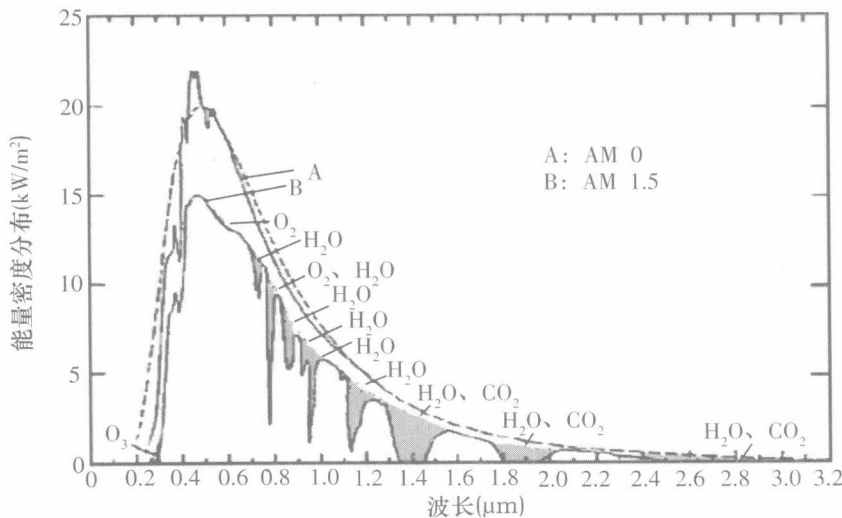


图 1-5 太阳能光谱分布

第三节 我国太阳能资源分布

我国是太阳能资源相当丰富的国家，绝大多数地区年平均日辐射量在 $4\text{kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 以上，西藏最高达 $7\text{kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。与同纬度的其他国家相比，和美国类似，比欧洲、日本优越得多。下述一、二、三类地区约占全国总面积的 $2/3$ 以上，年太阳辐射总量高于 $5000\text{MJ}/\text{m}^2$ ，年日照时数大于 2000h ，具有利用太阳能的良好条件。特别是一、二类地区，正是我国人口稀少、居住分散、交通不便的广大西北地区，经济发展相对落后。可充分利用当地丰富的太阳能资源，采用太阳能发电技术，发展经济，提高人民生活水平（图 1-6）。

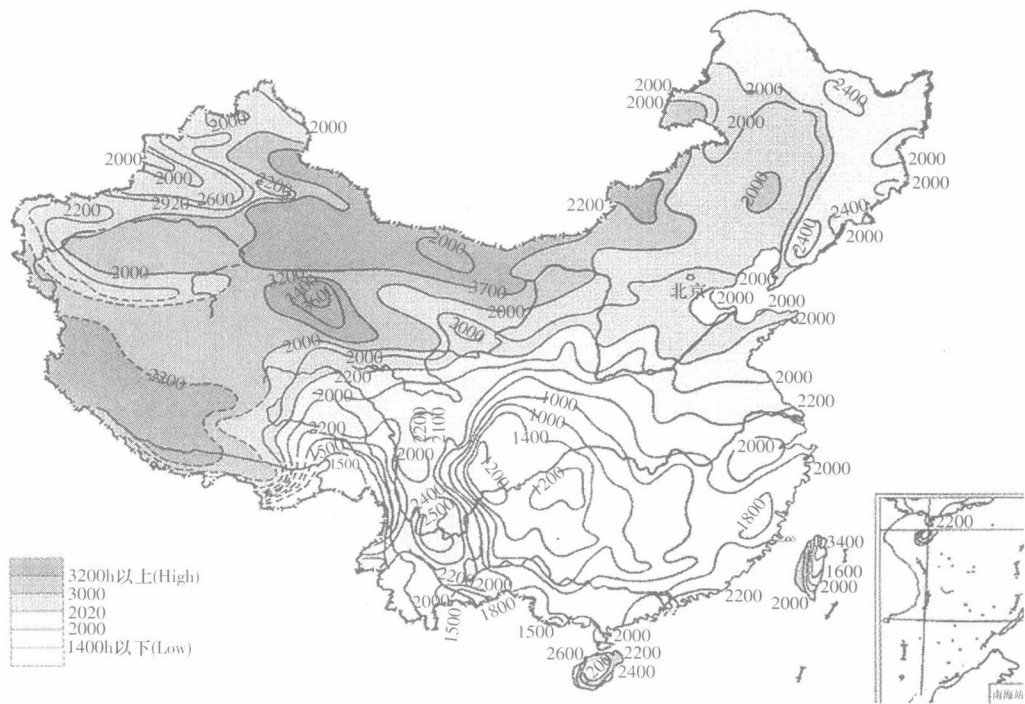


图 1-6 中国太阳能资源分布

我国的西藏、青海、新疆、甘肃、宁夏属于高日照地区；东部、南部及东北一般是中等日照区。根据各地接受太阳总辐射量的多少，可将全国划分为五类地区，如表 1-2 所示。

对比图 1-6 中国太阳能资源分布和表 1-2 我国太阳能资源分布，可以发现我国西部地区的太阳能资源平均都在每年 3000 小时以上，为太阳能资源丰富地区。合理利用充足的太阳能资源，推广太阳能光伏技术，提高当地技术人员水平，改善我国藏区人民的生活正是本书编写的初衷。

表 1-2 我国太阳能资源分布

地 区	年日照时数 (h)	年辐照量 ($\text{kJ}/\text{cm}^2 \cdot \text{a}$)
宁夏回族自治区北部	3200 ~ 3300	670 ~ 837
甘肃省西部		
新疆维吾尔自治区东南部		
青海省西部		
西藏自治区西部		
河北省西北部	3000 ~ 3200	586 ~ 670
山西省北部		
内蒙古自治区		
宁夏回族自治区南部		
甘肃省中部		
青海省东部		
西藏自治区东南部		
新疆维吾尔自治区南部		
山东省, 河南省	2200 ~ 3000	502 ~ 586
北京市, 河北省东南部		
山西省南部		
新疆维吾尔自治区北部		
吉林省, 辽宁省		
海南省, 云南省		
陕西省北部		
甘肃省东南部		
广东省南部		
福建省南部		
江苏省北部		
安徽省北部		
湖南省, 广西壮族自治区	1400 ~ 2200	419 ~ 502
上海市, 江西省, 浙江省		
湖北省, 黑龙江省		
福建省北部		
广东省北部		
陕西省南部		
江苏省南部		
安徽省南部		
四川省	1000 ~ 1400	335 ~ 419
贵州省		

第二章 太阳能电池

为便于介绍太阳能电池的工作原理，本章首先介绍一些有关半导体的物理知识。说明半导体材料中电子和空穴载流子产生的原理、能带结构等，以及少数载流子的产生、复合、扩散和漂移。从而深入了解 PN 结，太阳能电池的物理特性等内容。

第一节 半导体和 PN 结

一、半导体及其物理性质

固体材料按照导电性能，可以分为绝缘体、半导体和导体。绝缘体的电阻率很高，可以达到 $10^{10}\Omega \cdot \text{m}$ 以上；半导体材料的电阻率一般在 $10^{-5} \sim 10^8\Omega \cdot \text{m}$ ，制作太阳能电池的半导体需要高纯材料。而高纯硅料正是制作太阳能电池最理想的材料。纯硅晶体是立体结构、最外电子层有 4 个电子，当晶格震动或者可见光照射就会使电子跳跃并留下一个“空穴”（图 2-1）。

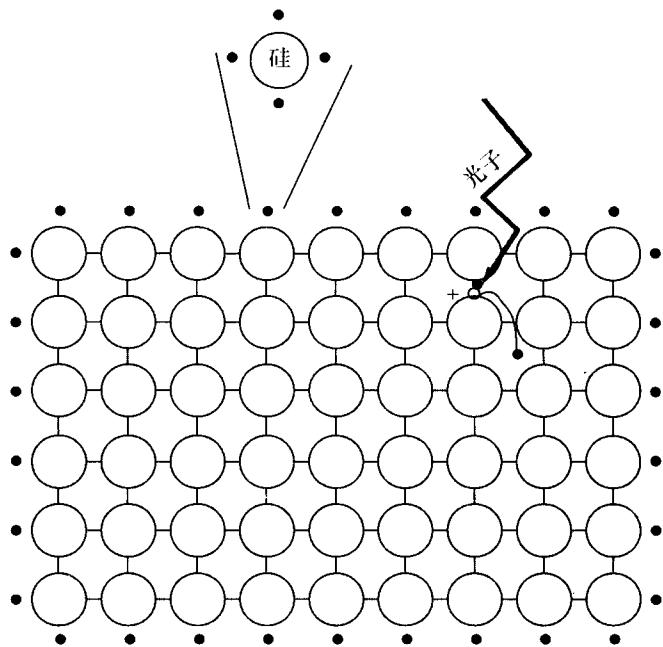


图 2-1 硅原子晶体结构

众所周知，原子是由原子核及其周围的电子构成的，一些电子脱离原子核的束缚，能够自由运动时，称为自由电子。金属之所以容易导电，是因为在金属内有大量能够自由运动的电子，在电场的作用下，这些电子有规则地沿着电场的相反方向流动，形成了电流。自由电子的数量越多，或者它们在电场的作用下规则流动的平均速度越高，电流就越大。电子流动运载的是电量，我们把这种运载电量的粒子，称为载流子。在常温下，绝缘体内仅有极少量的自由电子，因此对外不呈现导电性。

二、能级和能带

原子的壳层模型认为，原子的中心是一个带正电的核，核外存在着一系列不连续的、由电子运动轨道构成的壳层，电子只能在壳层里绕核转动。在稳定状态，每个壳层里运动的电子具有一定的能量状态，所以一个壳层相当于一个能量等级，称为能级。一个能级也表示电子的一种运动状态。一个元素的化学性质和物理性质是由其原子结构决定的，其中外层电子的数目起着最为重要的作用。通常把最外层电子称为价电子，一个原子有几个最外层电子就称它为几价原子。硅（Si）是第四主族元素之一，称为四价元素（图2-1）。

在一个孤立的原子中，电子只能在各个允许的轨道上运动，不同轨道的电子能量不同。在晶体中，原子之间的距离很近，相邻原子的电子轨道相互重叠、互相影响。这样，与轨道相应的能级，就不再是单一的电子能级，而是分裂为能量非常接近但又大小不同的许多电子能级。这些由许多条能量相差很小的电子能级所组成的区域，称为能带。如图2-2所示，外层的电子由于受相邻原子影响较大，它所对应的能带较宽；内层的电子则由于受相邻原子的影响较小，其所对应的能带则较窄。电子在能带中的分布，原则上总是先填满能量较低的能级，然后再逐步填充能量较高的能级。由于泡利不相容原理，每条能级只允许填充2个具有同样能量的电子。

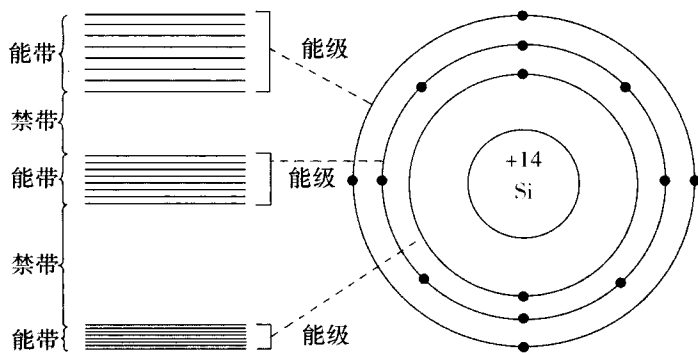


图2-2 电子轨道对应能带图

电子只能停留在所对应能带的能级上，能带和能带之间的区域电子是不能停留的。两个相邻能带之间不能为电子所占据的能量范围，称为禁带。当电子获得附加动能，电子能量增大，就有可能跃迁到较高的能级。电子能否跃迁除了电子能量外，还要看能带中无空的能级，当能带中的能级没有被电子填满，电子在外界电场的作用下，就会发生跃迁。电子在能带中总是先占据最低能级，然后依次上填。这种未被电子填满的能带称为导带。当能带中的能级被电子完全占据时，这种能带我们称之为满带或者价带。

价电子要从价带越过禁带到达导带，必须从外界获得一个至少等于 E_g 的附加能量，称为禁带宽度或者带隙，单位为电子伏特。金属和半导体的区别在于金属的导带和价带几乎重叠在一起，电子不需外电场的作用也可以直接从价带跃迁到导带；对于绝缘体来说，由于禁带宽度比较大，所以电子跃迁所需要的能量非常大，一般情况几乎不能发生跃迁；而半导体的禁带宽度范围则是介于两者之间（图 2-3）。

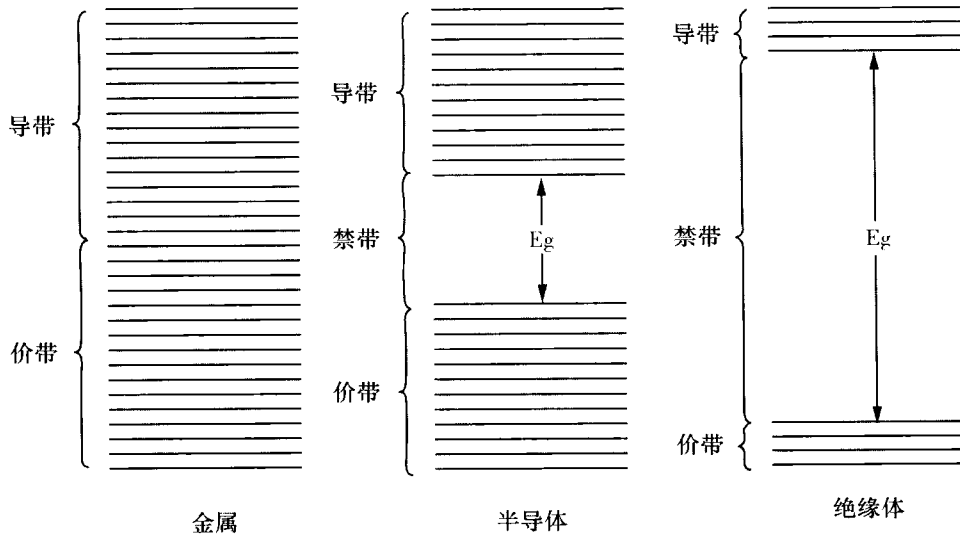


图 2-3 金属、半导体和绝缘体的能带示意图

三、本征半导体、掺杂半导体

晶格完整且不含杂质的半导体，称为本征半导体。这样的硅片称为本征硅片。由于半导体内含有杂质或存在晶格缺陷，作为自由载流子的电子或空穴中任意一方增多，就使得本征半导体变成掺杂半导体。

掺入 V 族元素（P）后，它的 5 个价电子除与相邻的硅原子形成共价键外，还多余 1 个价电子，与共价键能相比，这个剩余价电子非常容易释放出来，形成电子过剩的 N 型半导体。这类可以向半导体提供自由电子的杂质称为施主杂质。我们把数量多的电子称为多数载流子，将数量少的空穴称为少数载流子。

把 III 族元素（B）作为杂质掺入时，由于形成完整的共价键上缺少一个电子，所以就从相邻的硅原子中夺取一个价电子来形成完整的共价键。被夺走的电子留下一个空位，成为空穴，这也使半导体成为空穴过剩的 P 型半导体，可以接受电子的杂质原子称为受主杂质。这种情况下，多数载流子为空穴，少数载流子为电子（图 2-4）。

四、PN 结及内建电场

如果将两块均匀掺杂的 P 型硅（掺硼）和 N 型硅（掺磷）互相接触，如图 2-5 所示。由于交界面两侧的电子及空穴的浓度不同，N 型硅中的电子（多子）将会向 P 型区扩散，P 型硅中的空穴（多子）将会向 N 型区扩散。扩散后，在接触面的 N 区一侧