

建筑节能设计与实践丛书

光伏建筑设计与实践

罗 多 班广生 主编

中国建筑工业出版社

建筑节能设计与实践丛书

光伏建筑设计与实践

罗 多 班广生 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

光伏建筑设计与实践/罗多, 班广生主编. —北京:
中国建筑工业出版社, 2016. 6
(建筑节能设计与实践丛书)
ISBN 978-7-112-19190-1

I. ①光… II. ①罗… ②班… III. ①太阳能发
电-太阳能建筑-建筑设计 IV. ①TU18

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 041121 号

光伏发电在全球各类可再生能源中, 对国家节能减排、提高可再生能源利用比例起到了不可替代的作用, 而光伏建筑一体化是未来光伏应用中最重要领域之一。随着环境问题的日益凸显和经济发展向更可持续的路径转向, 其前景十分广阔, 有着巨大的市场潜力。本书深入探索了光伏与建筑两大领域交叉结合的方方面面, 从建筑美学到结构安全, 从热工学到电气学, 从材料到检测……, 收录并解说了大量国内外著名的光伏建筑一体化项目, 对未来的技术发展和探索也进行了展望。适合建筑设计人员、光伏系统工程师和相关大专院校师生使用。

* * *

责任编辑: 马 红

责任校对: 陈晶晶 党 蕾

建筑节能设计与实践丛书
光伏建筑设计与实践
罗 多 班广生 主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)
各地新华书店、建筑书店经销
霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版
北京市密东印刷有限公司印刷

*

开本: 850×1168 毫米 1/16 印张: 16½ 字数: 449 千字

2016 年 7 月第一版 2016 年 7 月第一次印刷

定价: 45.00 元

ISBN 978-7-112-19190-1

(28420)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)



序

太阳能光伏技术在国际范围内得到高度重视，光伏产业也以前所未有的速度迅猛发展。我国先后在光伏材料、光伏电池与组件、光伏逆变器及光伏装备等多个方面实现关键性突破，已经在光伏产业上牢牢占据了国际领先地位，用国家政府部门的话来说，就是我国光伏具有国际竞争力与话语权。近些年来，从中央到地方加大了光伏技术应用推广的力度，出台了多项激励政策与法规，2015 年我国的光伏安装计划达到了 25GW，在 2015 年底有望实现累计安装总量接近 50GW，一跃成为全球光伏安装总量最多的国家。

光伏技术应用是多方面的，从天上到地面、到工业、农业等各个方面都有广泛的应用空间。从光伏组件的特点来看，更适合作为功能型建筑材料利用，因此光伏技术与建筑结合也是光伏技术发展的一个重要方向。住房和城乡建设部在 2009 年 3 月出台“太阳能光电建筑应用”项目，从此揭开了我国光伏技术在城市应用发展的序幕。从我国建筑发展的前景来看，光伏技术在建筑的应用与结合将具有更大市场发展空间。

我曾在 2005 年从德国带回一本光伏专著：《建筑集成光伏—建筑外墙面的光伏建筑集成》（《Gebäudeintegrierte Photovoltaik-Architektonische Integration der Photovoltaik in die Gebäudehülle》），是德国人 Ingo B. Hagemann 博士编著的，该书系统阐述了光伏技术与建筑结合的相关理论与实际案例，我在国内多个场合进行了宣传，引起一些建筑师的极大兴趣。后来我又组织翻译了两位德国女建筑师编著的《太阳能光伏建筑设计》一书，由科学出版社出版，主要是介绍了欧洲老旧建筑、城区与风景区的光伏技术应用案例，也同样得到了光伏界与建筑界人士的高度认可。

如今这本《光伏建筑设计与实践》是我国一些建筑专家集体编写的，内容丰富，有理论、有实际应用，涉及的内容包括光伏发电基本知识、光伏发电系统、光伏与建筑的有机结合、光伏建筑系统的检测及验证、光伏建筑系统的技术研究与发展方向。作者多为从事建筑行业多年的建筑师，主要结合自身的工程实践，总结我国近年来光伏建筑发展的相关经验与案例，可以为我国光伏技术与建筑结合及光伏建筑发展，提供很好的理论指导与技术参考。

罗多女士是一位年轻有为的建筑师，在十多年前就加盟从事光伏技术的专业公司，正好赶上我国光伏技术发展的大好时期，她亲身参与了多项建筑中利用光伏技术的工程实践。早在一两年前她就让我给本书作序，我当时欣然接受。现在这本书即将出版，我感到很高兴，相信这本书一定会得到读者的欢迎与认可。

建筑是光伏技术应用的最好载体，在建筑外墙加上光伏组件就可以将建筑从消耗能源变为生产能源，即每栋建筑就是一座发电厂。光伏技术将为建筑注入新的灵魂与生命，从此建筑每天都会与太阳对话，将变得更具美感、更有活力。光伏技术大规模应用的时代正在到来，让我们去迎接这个美好的未来吧。是为序。

沈 辉

中山大学太阳能系统研究所，2015 年 10 月 28 日

前 言

随着《京都议定书》的正式生效，实现环境保护的可持续发展成为全球最强的呼声。作为世界第二大经济体的中国，虽然仍然是发展中国家，却一直努力承担着与自身角色相当的节能减排义务，而作为能耗大户的建筑，更是中国长期节能减排的重要领域。降低建筑能耗，实施建筑节能，对于促进能源资源节约和合理利用，缓解我国的能源供应与经济社会发展的矛盾，有着举足轻重的作用；也是保障国家资源安全、保护环境、提高人民群众生活质量、贯彻落实科学发展观的一项重要举措。因此，如何降低建筑能源消耗，提高能源利用效率，实施建筑节能，是我国可持续发展亟待研究解决的重大课题。

在当前建筑节能设计领域以“被动优先主动优化”为设计原则的理念指导下，可再生能源在建筑中的使用同样举足轻重。而在建筑中最适宜最普遍使用的太阳能光伏发电技术也成为建筑节能的重要技术，同时，建筑作为分布式光伏系统最重要的载体和消纳也成为能源领域关注的对象。建筑光伏系统属于可再生能源和建筑这两个领域和交叉领域，中国虽然在这一领域无疑是全世界应用最大的国家，但是历史却非常的短，经验相对于传统领域来说可谓非常不足。所以，鲜见有这个领域的专业书籍出版。

本书编写历时4年之久，其间经历了光伏的爆发式增长期，随着技术的不断进步和完善，市政和政策的不断变化，书中的很多数据年年修改。时至今日，仍然不能代表当下的最新数据。由于建筑光伏系统技术日新月异，涉及专业较多，应用本身也有很多问题和空白，加之作者水平有限，本书的一些相关内容和观点如有不尽合理之处，欢迎批评指正。

本书的编写也得到了业内同行的大力支持和帮助。感谢林伟、孙韵林对第一章的参与编写，徐勤、刘雄对第四章的参与编写。一并感谢史国华、张志坚、周心、章放、李姝、王晓丹、林佳楠、黎明玥对本书的编著工作和校对提供帮助！

罗多

2016年5月

目 录

第 1 章 光伏发电基本知识 1

1.1 太阳与太阳能 1

1.1.1 日地运动规律 1

1.1.2 太阳辐射 3

1.1.3 太阳资源分布 4

1.2 光伏发展历史及政策 7

1.2.1 太阳能光伏电池技术及应用 发展史 7

1.2.2 政策对太阳能光伏的影响力 8

1.3 光伏发电技术基础 9

1.3.1 光伏发电原理 9

1.3.2 太阳电池输出基本性能参数 10

1.3.3 太阳电池效率损失机制 11

1.3.4 太阳电池分类 12

1.4 光伏组件 19

1.4.1 晶体硅光伏组件 19

1.4.2 薄膜光伏组件 20

1.4.3 光伏构件 21

第 2 章 光伏发电系统 24

2.1 光伏系统基本概念与分类 24

2.1.1 基本概念 24

2.1.2 系统的分类 30

2.1.3 光伏系统与电网 33

2.2 光伏系统电气设计的基本要素 33

2.2.1 环境要素 33

2.2.2 光伏阵列 34

2.2.3 电力系统 34

2.2.4 负载系统 35

2.2.5 监控系统 36

2.2.6 其他因素 39

2.3 建筑光伏发电系统设计 40

2.3.1 独立系统设计 41

2.3.2 并网系统设计 47

2.3.3 微网系统设计 54

2.3.4 系统的设备选型 57

2.3.5 光伏系统效率 59

2.4 建筑光伏系统相关软件 60

2.4.1 光伏系统软件简介 60

2.4.2 光伏系统应用软件 61

第 3 章 光伏与建筑的有机结合 68

3.1 光伏建筑的优越性 69

3.1.1 建筑自动化 69

3.1.2 直接推进建筑节能 69

3.1.3 绿色能源, 环保减排 69

3.1.4 产生电能 69

3.1.5 美化建筑 69

3.1.6 结构牢固 69

3.1.7 具有良好的透光率 69

3.1.8 隔音 69

3.1.9 遮阳 70

3.1.10 降低工作及管理成本 70

3.1.11 直接产出可有偿转让的温室 气体排放指标	70
3.2 光伏建筑的必要性	70
3.2.1 建筑节能	70
3.2.2 建筑用电的削峰填谷	70
3.2.3 即发即用	71
3.2.4 节约用地	71
3.2.5 降低城市热岛效应	71
3.2.6 随处可建	71
3.2.7 推动行业发展	71
3.3 光伏建筑的价值	72
3.3.1 社会价值——低碳	72
3.3.2 示范价值——引领	72
3.3.3 商业价值——概念	76
3.3.4 奉献价值——优选	78
3.3.5 经济价值——回报	80
3.4 光伏建筑的规划设计	81
3.4.1 规划的深度和广度	81
3.4.2 能源规划	81
3.4.3 建筑密度规划	82
3.4.4 绿化规划	82
3.4.5 光反射	82
3.5 光伏建筑的建筑设计要求	83
3.5.1 建筑布局	83
3.5.2 结构安全性设计	86
3.5.3 光影分析	91
3.5.4 散热分析	96
3.5.5 太阳电池构件的设计与 选择	106
3.5.6 最佳倾角、方位、间距	116
3.5.7 建筑光伏系统的类型	117
3.5.8 支撑系统	137
3.6 光伏建筑的各项物理性能	146
3.6.1 美观性能	147
3.6.2 设计寿命(耐久耐候性)	148
3.6.3 结构性能	148

3.6.4 热工性能	148
3.6.5 防火性能	149
3.6.6 防雷性	149
3.6.7 可维护性	150

第4章 光伏建筑系统的检测及验证..... 152

4.1 检测认证	152
4.1.1 光伏建筑系统中光伏电池板的 性能要求及检测	155
4.1.2 建筑光伏幕墙性能检测	176
4.1.3 光伏发电系统的现场检查	190
4.1.4 光伏发电系统的现场测试	193
4.2 光伏建筑工程的调试	195
4.2.1 光伏组件与方阵的常见 故障及排除	195
4.2.2 太阳能光伏发电系统的 检查测试	195
4.3 维护	196
4.3.1 太阳能光伏发电系统的运行 维护	196
4.3.2 太阳能光伏发电系统的故障 排除	198

第5章 光伏建筑系统的技术研究与 发展方向 199

5.1 太阳能级多晶硅料的提纯	200
5.2 高效太阳能电池研究	200
5.3 建材型光伏构件的关键技术 研究	201
5.3.1 真空光伏构件	202
5.3.2 有机背板光伏构件	206
5.4 光伏系统研究	210
5.4.1 高效光伏建筑系统之热性能 研究	210
5.4.2 BOS系统研究	224

5.5 分布型区域性智能微电网	227
5.5.1 智能微电网的定义与意义	229
5.5.2 微电网的特点	229
5.5.3 微电网的各项技术	230
5.5.4 孤岛模式的微电网案例 分析	231
5.5.5 并网模式的微电网案例 分析	241

5.6 分布式光伏能源系统在绿色建筑中 的研究和应用	243
5.6.1 绿色建筑的定义与发展	243
5.6.2 光伏在绿色建筑中的重要性和 必要性	245
5.6.3 经典绿色建筑中的分布式光伏 系统设计案例	246

第 1 章 光伏发电基本知识

相信从人类拥有独立思考的能力开始，人们就在思考悬挂在天空中每天东出西落的“神物”——太阳存在的意义。可以说，人类对太阳的理解、研究和追求，从文明一开始甚至之前就一直孜孜不倦，也可以说，只要人类还存在就不会放弃对太阳的研究和追求。那么，什么是太阳，什么是太阳能，如何将它转换为我们现代生活中不可缺少的高品位能源——电？本章将逐一为您阐述太阳能发电的基本知识。

1.1 太阳与太阳能

太阳是离地球最近的一颗恒星，集中了太阳系 99.86% 的总质量。作为太阳系里唯一的恒星，太阳给地球带来了光和热。由于太阳光的照射，地面平均温度才会保持在 14°C 左右，提供了人类和绝大部分生物生存的条件。除了原子能、地热和火山爆发的能量外，地面上大部分能源几乎全部直接或间接与太阳有关。比如：各种植物通过光合作用直接利用太阳能，煤炭、石油、天然气等化石燃料也是由古代埋在地下的动植物经过漫长的地质年代形成的。它们实质上是由古代生物固定下来的太阳能。

此外，水能、风能等也都是间接由太阳能转换来的。因此，了解太阳和太阳能是有效利用太阳能的必然前提。

太阳是一个靠内部核聚变反应产生热量的气体球，半径为 $6.96 \times 10^5 \text{ km}$ ，是地球半径的 109 倍；质量约为 $1.99 \times 10^{27} \text{ t}$ ，相当于地球质量的 33 万倍；从内到外主要分为：核心区、辐射区、对流区，有光球、色球和日冕等结构，太阳能辐射以 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 的速度穿越太空射向四面八方。地球只接收到太阳总辐射的二十二亿分之一，由于穿越大气层时的衰减，最后约 $85 \times 10^{12} \text{ kW}$ 到达地球表面，这个数量相当于全世界发电量的几十万倍。

根据目前太阳产生的核能速率估算，氢的储量足够维持 600 亿年，而地球内部组织因热核反应聚合成氦，即地球寿命约为 50 亿年，从这一角度上可以认为，太阳的能量是取之不尽、用之不竭的。

1.1.1 日地运动规律

1. 地球的自转和公转

地球绕通过它自身南极和北极的地轴自西向东地自转。每自转一周 360° 耗时约 24h，即一昼夜，每小时自转 15° （如图 1-1a）。

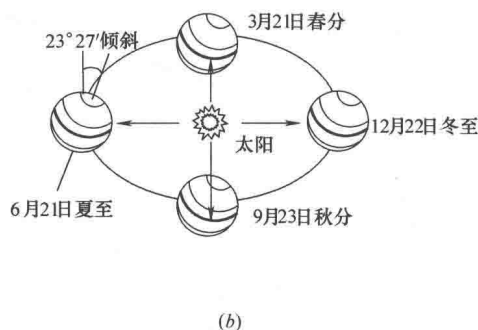
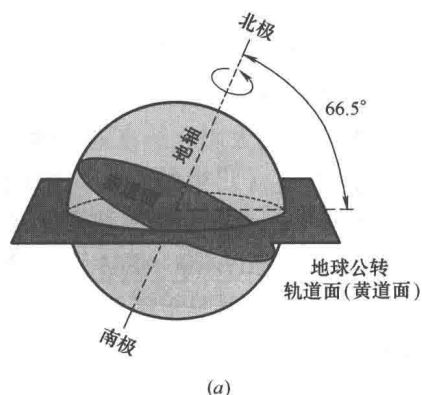


图 1-1 地球的自转和公转

(a) 自转；(b) 公转

地球自转的同时也绕着太阳公转,公转周期为一年,如图 1-1 (b) 所示,运动轨迹为偏心率很小的近似于椭圆形轨道,被称为黄道。由于地球赤道和公转轨道(黄道面)之间成 $23^{\circ}27'$ 夹角(黄赤夹角),且地球公转时地轴的方向始终保持指向地球北极,因此使得地球处于公转轨道的不同位置时,太阳光线垂直入射到地球上的位置也有所不同,太阳直射点在北纬 $23^{\circ}27'$ 纬度圈(北回归线)和南纬 $23^{\circ}27'$ 纬度圈(南回归线)之间来回运动,从而形成了地球一年四季的变化。

2. 太阳视运动

由于地球的自转,使位于地球上的人觉得太阳每天都是从东方升起,又在西方落下。太阳的视运动(apparent motion)是以观测者为参考系,观测太阳的运动轨迹,观测到的太阳位置与观测者所处位置、日期和一天中的时刻有关。假设观察者位于地球北半球中纬度地区,可以对太阳的周年视运动情况作如下描述^[1]:

每年的春分日(3月21日),太阳从赤道以南到达赤道(太阳赤纬 $\delta=0^{\circ}$),在周日视运动中,太阳出于正东而没于正西,白昼和黑夜等长。太阳在正午的高度等于 $90^{\circ}-\varphi$ (φ 为观察者当地的地理纬度)。夏至日(6月21日),太阳正午高度达到最大值 $90^{\circ}-\varphi+23^{\circ}27'$,白昼最长,这时地球北半球天文夏季开始。夏至过后,太阳正午高度逐日降低,同时白昼缩短,太阳的升落又趋向正东和正西。

秋分日(9月23日),太阳又从赤道以北到达赤道(太阳赤纬 $\delta=0^{\circ}$),在周日视运动中,太阳又出于正东而没于正西,白昼和黑夜等长。秋分过后,太阳的升落点逐日移向南方,白昼时间缩短,黑夜时间增长,正午时太阳的高度逐日减低。冬至日(12月22日),太阳正午高度达到最小值 $90^{\circ}-\varphi-23^{\circ}27'$,黑夜最长,这时地球北半球天文冬季开始。冬至过后,太阳正午高度逐日升高,同时白昼增长,太阳的升落又趋向正东和正西,直到春分日(3月21日)太阳从赤道以南到达赤道。

3. 太阳赤纬、高度角和方位角

(1) 赤纬 (Declination, δ)

赤纬 δ 是确定太阳位置的关键角度参量之一。通常把太阳直射点的纬度,即太阳光线与地球赤道面的夹角称为赤纬或赤纬角。在一年当中,太阳赤纬每天都在变化,但不超过 $\pm 23^{\circ}27'$ 的范围,只有在春分或秋分这一天,赤纬角才等于 0° 。 δ 的值可根据库珀 (Cooper) 方程计算得到:

$$\delta = 23.45^{\circ} \sin \left[360 \times \frac{284+n}{365} \right] \quad (1-1)$$

其中, n 为一年中之天数,如:在春分, $n=81$, 则 $\delta=0^{\circ}$ 。

(2) 太阳高度角 (Solar altitude, h)

太阳高度角 h 是太阳光线与其在地平面上投影线之间的夹角,如图 1-2 所示。

计算太阳高度角的表达式为:

$$\sin h = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad (1-2)$$

式中 ϕ ——地理纬度;

δ ——太阳赤纬;

ω ——太阳时角。太阳时角 ω 定义为:在正午时 $\omega=0^{\circ}$, 每隔 1h 增 15° , 上午为正, 下午为负。例如:上午 11 时, $\omega=+15^{\circ}$; 下午 3 时, $\omega=-15^{\circ} \times 3 = -45^{\circ}$ 。

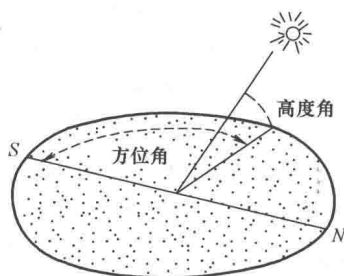


图 1-2 太阳高度角和方位角的定义

(3) 太阳方位角 (Solar azimuth, γ)

太阳方位角 γ 是太阳光线在地平面上的投影与地平面上正南(北半球)方向之间的夹角,如图 1-2 所示。太阳方位角按下式计算:

$$\cos \gamma = \frac{\sin h \sin \phi - \sin \delta}{\cos h \cos \phi} \quad (1-3)$$

也可用下式计算:

$$\sin \gamma = \frac{\cos \delta \sin \zeta}{\cos h} \quad (1-4)$$

其中,天顶角 (Zenith angle) ζ 是太阳光

线与地平面法线之间的夹角，天顶角与高度角之间的关系为 $\zeta + h = 90^\circ$ 。

根据地理纬度、太阳赤纬及观测时间，利用式 (1-3) 或式 (1-4) 中的一个可以求出任何地区、任何季节某一时刻的太阳方位角。

1.1.2 太阳辐射

1. 太阳常数

由于日地之间距离很大，其相对变化量是很小的，由此引起的太阳辐射强度的相对变化不超过 $\pm 3.4\%$ 。地球大气层外的太阳辐射强度几乎是一个常数。因此，人们使用“太阳常数”来描述大气层上界的太阳辐射强度。

太阳常数 I_{sc} 的定义为：在平均日地距离时，地球大气层上界垂直于太阳光线表面的单位面积上单位时间内所接收到的太阳辐射能。其参考值为 $I_{sc} = 1367 \pm 7 \text{ W/m}^2$ 。

由上述定义知道， I_{sc} 是平均日地距离时的太阳辐射强度。若设大气层上界某一任意时刻的太阳辐射强度为 I_0 ，则

$$I_0 = I_{sc} \left[1 + 0.034 \cos \left(\frac{2\pi n}{365} \right) \right] = I_{sc} r \quad (1-5)$$

式中 n ——距离 1 月 1 日的天数；

r ——日地间距引起的修正值。

2. 大气质量

大气质量 (Air Mass, AM) 是一个无量纲量，是指太阳光线穿过地球大气的路径与太阳光线在天顶角方向时穿过大气的路径之比。

如图 1-3 所示，A 为地球海平面上一点，O、O' 为大气上界的点。太阳在天顶位置时，太阳光线路程 OA 为大气质量。太阳位于 S' 点

时，大气质量为：

$$m(\theta_z) = \frac{O'A}{OA} = \sec \theta_z = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (1-6)$$

式 (1-6) 是从三角函数关系推导出来的，是以地表为水平面忽略了大气的曲率及折射因素的影响。在地球大气层外接收到的太阳辐射能，未受到地球大气层的反射和吸收，因此，地球大气上界的大气质量 $m=0$ ，以 AM0 标示；假定在标准大气压 (101325Pa) 和气温 0°C 时，海平面上太阳光线垂直入射的路径为 1，即 $m=1$ ，以 AM1 表示；当天顶角为 60° 时， $m=2$ ，即 AM2。标准测试条件中的 AM1.5，即为天顶角为 48.2° 时的大气质量。

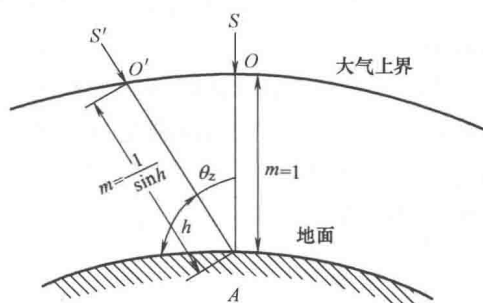


图 1-3 大气质量示意图

3. 太阳光谱

太阳辐射 (solar radiation) 是指太阳向宇宙空间发射的电磁波和粒子流。太阳辐射中辐射能按波长的分布，称为太阳辐射光谱，见图 1-4。从图中可看出，大气上界太阳光谱能量分布曲线，与用普朗克黑体辐射公式计算出的 6000K 的黑体光谱能量分布曲线非常相似。因此，可以把太阳辐射看做黑体辐射。

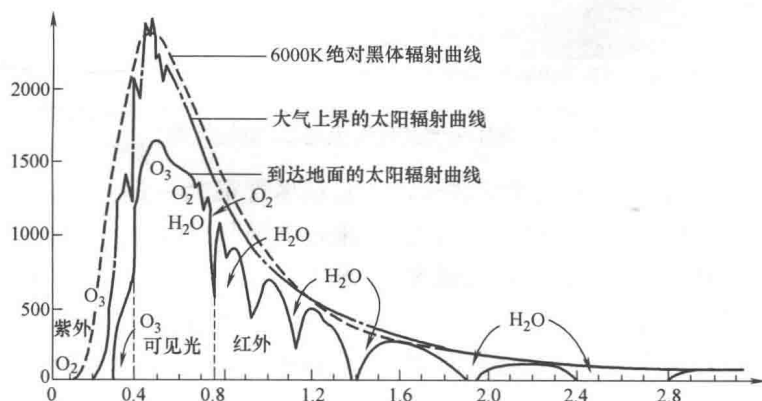


图 1-4 6000K 绝对黑体、大气上界和地面太阳辐射光谱曲线

太阳辐射通过大气层后到达地球表面。由于大气对太阳辐射有一定的吸收、散射和反射作用,使投射到大气上界的辐射不能完全到达地表面。与大气上界的太阳辐射光谱相比较,可以看出:通过大气层后,太阳总辐射能有明显的减弱;波长短的辐射能减弱得最为显著;辐射能随波长的分布变得极不规则。

到达地面的太阳辐射由两部分组成:一部分是太阳以平行光的形式直接投射到地面上的,称为直接辐射(Direct radiation);另一部分是经过散射后到达地面的,称为散射辐射(Diffusion radiation);两者之和是到达地面的太阳总辐射。因此,针对地表上的太阳光谱能量可分为 AM1.5G(global)与 AM1.5D(direct),其中 AM1.5G 即是包含散射辐射的太阳总辐射能量,而 AM1.5D 则是只包含直接辐射光谱,其近似等于 AM0 的 72%(其中 18%被大气吸收,10%被大气散射)。

1.1.3 太阳资源分布

1. 太阳能

常说的太阳能(Solar Energy)一般指太阳的辐射能量。尽管太阳辐射到地球大气层

的能量仅为其总辐射能量的二十二亿分之一,但已高达 173000TW。到达地球表面的太阳辐射功率为 8×10^5 亿 kW,太阳每秒钟照射到地球上的能量就相当于燃烧 500 万 t 煤释放的热量。当把太阳能作为一种能源对待时,与煤炭、石油、天然气、核能等矿物燃料相比,具有以下明显的优点:

1) 普遍:太阳光普照大地,全球各地每个人头顶都有一个太阳,没有地域的限制,无论陆地或海洋,无论高山或岛屿,处处皆有,可直接开发和利用,便于采集,且无须开采和运输。

2) 无害:开发利用太阳能不会污染环境,它是最清洁的能源之一,在环境污染越来越严重的今天,这一点是极其宝贵的。

3) 巨大:每年到达地球表面上的太阳辐射能约相当于 130 万亿 t 煤的热量,其总量属现今世界上可以开发的最大能源。从图 1-5 欧洲联合研究中心(JRC)的预测可以看出:对比目前可以开发的所有能源,太阳能发电在 2050 年会成为绝对趋势,同时,从表 1-1 美国能源部 Office of Science 的报告也可以看到 2050 年以后,任何能源将不能再满足所预测的全世界能耗需求,除了巨大的太阳能以外。

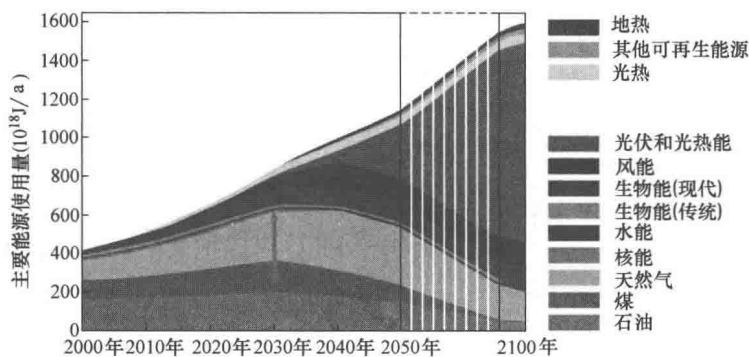


图 1-5 为什么说光伏发电是 21 世纪能源？

4) 长久:根据太阳产生的核能速率估算,氢的贮量足够维持上百亿年,而地球的使用寿命也就约为几十亿年,从这个意义上讲,可以说太阳的能量是取之不尽、用之不竭的。

当然,太阳能在转化为可利用的能源时也存在明显的缺点:

1) 分散性:到达地球表面的太阳辐射的

总量尽管很大,但是能流密度很低。平均说来,北回归线附近,夏季在天气较为晴朗的情况下,正午时太阳辐射的辐照度最大,在垂直于太阳光方向 1m^2 面积上接收到的太阳能平均有 1000W 左右;若按全年日夜平均,则只有 200W 左右。而在冬季大致只有一半,阴天一般只有 1/5 左右,这样的能流密度是很低

的。因此,在利用太阳能时,想要得到一定的转换功率,往往需要面积相当大的一套收集和转换设备,这种主动地利用太阳能的方式无疑提高了造价。

2) 不稳定性:由于受到昼夜、季节、地理纬度和海拔高度等自然条件的限制以及晴、阴、云、雨等随机因素的影响,到达某一地面的太阳辐照度既是间断的,又是极不稳定的,这给太阳能的大规模应用增加了难度。为了使太阳能成为连续、稳定的能源,甚至最终成为能够与常规能源相竞争的替代能源,就必须很好地解决蓄能问题。如果能够解决储能、输送和控制问题,就能充分利用全地球的太阳能,使之成为未来能源的主体。

3) 效率低和成本高:太阳能利用的发展速度非常快,未来成为替代能源在理论上是可行的,但目前明显存在太阳能的使用效率低的问题,目前大规模商业化的太阳能组件转换效率不超过 18%,系统效率不超过 15%。低效率的太阳能利用装置必然带来成本较高的问题,因此,不断提高太阳电池转换效率的研究是太阳能行业永恒持续的话题。

2. 全球太阳能资源分布

全球太阳能资源的分布情况,取决于各地的纬度、海拔高度及气候情况,一般以全年总辐射量(annual irradiation)来表示,单位为兆焦耳/($\text{m}^2 \cdot \text{年}$)/($\text{MJ}(\text{m}^2 \cdot \text{a})$)或千瓦·时/($\text{m}^2 \cdot \text{年}$)($\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$),数值为实地测量。有时也用全年日照总时数(annual sunshine hours)来表示,描述了一年中每天超过约 $120\text{W}/\text{cm}^2$ 辐射强度的日照时数。图 1-6 显示了世界太阳能资源的分布。总体而言,全世界太阳能辐射强度和日照时间最佳的区域包括北非、中东地区、美国西南部和墨西哥、南欧、澳大利亚、新西兰、南非、南美洲东、西海岸和中国西部地区等。其中北非地区是世界太阳能辐照最强烈的地区之一,摩洛哥、阿尔及利亚、突尼斯、利比亚和埃及太阳能发电潜能很大。摩洛哥的太阳年辐照总量 $9360\text{MJ}/\text{m}^2$,阿尔及利亚的太阳年辐照总量 $9720\text{MJ}/\text{m}^2$,埃及的太阳年辐照总量 $10080\text{MJ}/\text{m}^2$ 。南欧的太阳年辐照总量超过 $7200\text{MJ}/\text{m}^2$ 。这些

国家包括葡萄牙、西班牙、意大利、希腊和土耳其等。葡萄牙太阳年辐照总量为 $7560\text{MJ}/\text{m}^2$,西班牙太阳年辐照总量为 $8100\text{MJ}/\text{m}^2$,意大利太阳年辐照总量为 $7200\text{MJ}/\text{m}^2$,希腊太阳年辐照总量为 $6840\text{MJ}/\text{m}^2$,西班牙的南方地区是最适合于建设太阳能发电站的地区之一。中东几乎所有地区的太阳能辐照能量都非常高,沙特阿拉伯的太阳年辐照总量为 $8640\text{MJ}/\text{m}^2$,阿联酋的太阳年辐照总量为 $7920\text{MJ}/\text{m}^2$,伊朗的太阳年辐照总量为 $7920\text{MJ}/\text{m}^2$,约旦的太阳年辐照总量约 $9720\text{MJ}/\text{m}^2$,以色列的太阳年辐照总量为 $8640\text{MJ}/\text{m}^2$,以色列的总陆地区域是 20330km^2 。美国也是世界上太阳能资源最丰富的地区之一。根据美国 239 个观测站 1961~1990 年 30 年的统计数据,全国一类地区太阳年辐照总量为 $9198 \sim 10512\text{MJ}/\text{m}^2$,占总面积的 9.36%。二类地区太阳年辐照总量为 $7884 \sim 9198\text{MJ}/\text{m}^2$,占总面积的 35.67%。三类地区太阳年辐照总量为 $6570 \sim 7884\text{MJ}/\text{m}^2$,占总面积的 41.81%。四类地区太阳年辐照总量为 $5256 \sim 6570\text{MJ}/\text{m}^2$,占总面积的 9.94%。五类地区太阳年辐照总量为 $3942 \sim 5256\text{MJ}/\text{m}^2$,占总面积的 3.22%。澳大利亚的太阳能资源也很丰富。全国一类地区太阳年辐照总量 $7621 \sim 8672\text{MJ}/\text{m}^2$,占总面积的 54.18%。二类地区太阳年辐照总量 $6570 \sim 7621\text{MJ}/\text{m}^2$,占总面积的 35.44%。三类地区太阳年辐照总量 $5389 \sim 6570\text{MJ}/\text{m}^2$,占总面积的 7.9%。太阳年辐照总量低于 $6570\text{MJ}/\text{m}^2$ 的四类地区仅占 2.48%。澳大利亚中部的广大地区人烟稀少、土地荒漠,适合于大规模的太阳能开发利用。其次,太阳能资源丰富程度中等地区为:欧洲西南部、巴西、东南亚、大洋洲、中国中东部、朝鲜和中非;太阳能资源丰富程度中低地区为:东欧和日本;太阳能资源丰富程度最低地区为:加拿大与欧洲西北部。

3. 中国太阳能资源分布

我国陆地表面每年接收的太阳辐射能约为 147×108000 万 kWh ,相当于 2.4×10^4 亿 t 标准煤,属太阳能资源丰富的国家之一。中国太阳年辐射总量大致可以从内蒙古的锡林浩特和云南腾冲连一直线分为东、西两部分。东部

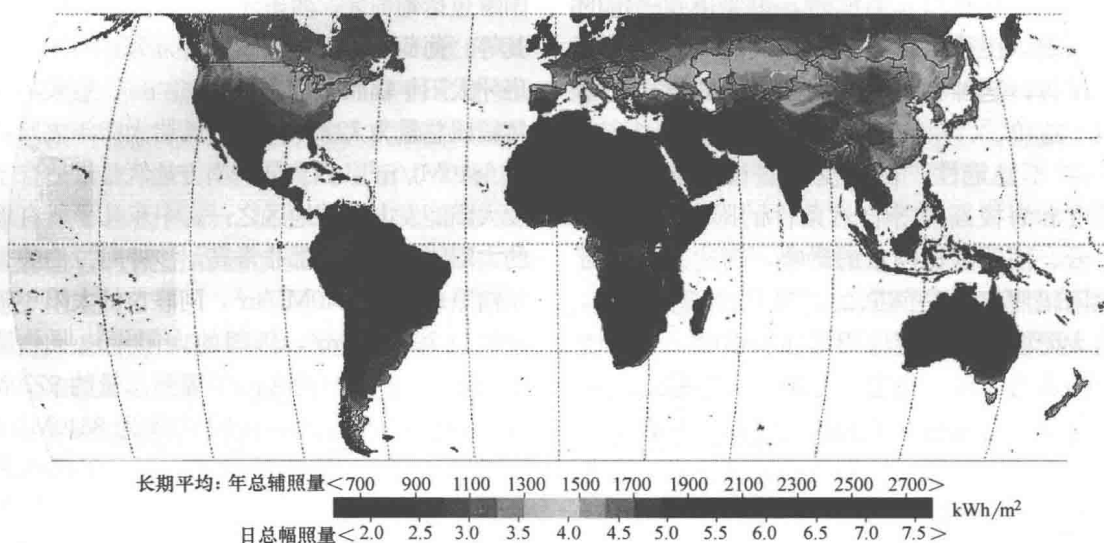


图 1-6 世界太阳能资源分布

地区太阳年辐射总量在 $5500\text{MJ}/\text{m}^2$ 以下，整体较弱。西部地区太阳年辐射总量整体强于东部，高值中心在地势高、云量少的青藏高原地区，年辐射总量基本在 $6500\text{MJ}/\text{m}^2$ 以上，最大值在格尔，可达 $8570\text{MJ}/\text{m}^2$ ，为全国之冠；青海、内蒙古西部和北部、甘肃中北部、四川西部的年辐射总量也很丰富，均高于 $6000\text{MJ}/\text{m}^2$ ；天山以北、阿尔泰山以

西的新疆北部年辐射总量略低，最高值不超过 $5500\text{MJ}/\text{m}^2$ 。

为了便于中国太阳能资源的规模化开发利用，应根据太阳能利用的技术特征、太阳能资源量的区域差异等来划分评价指标等级。采用太阳总辐射年辐射量作为分级指标，将太阳能资源划分为四个等级：极丰富（Ⅰ）、很丰富（Ⅱ）、丰富（Ⅲ）以及一般（Ⅳ）（表 1-1）。

中国太阳能资源区划标准

表 1-1

等级	资源带号	典型城市地区	年辐射总量(MJ/m^2)	与国外相当地区
最丰富带	Ⅰ	拉萨	≥ 6300	印度和巴基斯坦北部
很丰富带	Ⅱ	北京、呼和浩特、昆明、乌鲁木齐	$5040 \sim 6300$	印度尼西亚和美国华盛顿地区
较丰富带	Ⅲ	广州、福州、长沙、武汉、上海、西安、郑州、沈阳、哈尔滨	$3780 \sim 5040$	意大利米兰地区
一般	Ⅳ	成都、贵阳、重庆	< 3780	欧洲部分地区

如果要用于建筑光伏系统的设计和投资分析，还需要包括更多的环境参数。可利用离项目建设地最近的气象站的太阳能辐射数据及环境参数，气象站最好具有连续 20 年以上的长期观测记录数据，采集的信息尽可能地包括：

1) 气象站长期观测记录所采用的标准、辐射仪器型号、安装位置、高程、周边环境状况，以及建站以来的站址迁移、辐射设备维护记录、周边环境变动等基本情况和时间。

2) 最近连续 10 年以上的逐年各月的总辐

射量、直接辐射量、散射辐射量、日照时数的观测记录，且与站址现场观测站同期至少一个完整年的逐小时的观测记录。

3) 最近连续 10 年的逐年各月最大辐照度的平均值。

4) 近 30 年来的多年月平均气温、极端最高气温、极端最低气温、昼间最高气温、昼间最低气温。

5) 近 30 年来的多年平均风速、多年极大风速及发生时间、主导风向，多年最大冻土深

度和积雪厚度,多年年平均降水量和蒸发量。

6)近30年来的连续阴雨天数、雷暴日数、冰雹次数、沙尘暴次数、强风次数等灾害性天气情况。

除此之外,还应该了解项目所在地的地理资料,比如经纬度、海拔高度、地形地貌;空气质量,比如空气污染指数、能见度等。

1.2 光伏发展历史及政策

1.2.1 太阳能光伏电池技术及应用发展史

从1839年法国科学家贝克勒尔发现液体的光生伏特效应起,太阳电池经过了170多年漫长的发展历史。对太阳电池的实际应用起到决定性作用的是美国贝尔实验室三位科学家关于单晶硅太阳电池的研制成功,在太阳电池发展史上起到了里程碑的作用。随着技术的不断创新和发展,直到包括材料、器件、系统及各种技术应用的整个光伏产业链的形成,光伏技术展现了具有与化石能源发电技术竞争的强大发展潜力。

回顾历史有利于我们了解光伏技术的发展历程,按时间的发展顺序,将与太阳电池发展有关的历史事件汇总如下:

——1839年,法国实验物理学家亚历山大·埃德蒙·贝克勒尔(A. E. Becquerel)发现液体的光生伏特效应,简称为光伏效应。

——1877年, W. G. Adams 和 R. E. Day 研究了硒(Se)的光伏效应,并制作第一片硒太阳电池。

——1883年,美国发明家 Charles Fritts 描述了第一片硒太阳电池的原理。

——1921年,德国物理学家爱因斯坦由于1904年提出的解释光电效应的理论获得诺贝尔(Nobel)物理奖。

——1951年,生长p-n结,实现制备单晶锗电池。

——1953年,Wayne州立大学的Dan Trivich博士完成基于太阳光谱的具有不同带隙宽度的各类材料光电转换效率的第一个理论计算。

——1955年,西部电工(Western Electric)开始出售硅光伏技术商业专利。

——1958年,美国信号部队的T. Mandelkorn制成n/p型单晶硅光伏电池,这种电池抗辐射能力强,这对太空电池很重要;Hoffman电子的单晶硅电池效率达到9%;第一个光伏电池供电的卫星先锋1号发射,光伏电池 100cm^2 , 0.1W ,为一备用的5MW的话筒供电。

——1980年,ARCO太阳能公司是世界上第一个年产量达到1MW的光伏电池生产厂家;三洋电气公司利用非晶硅电池率先制成手持式袖珍计算器,接着完成了a-Si组件批量生产并进行了户外测试。

——1984年,面积为 1ft^2 (929cm^2)的商品化非晶硅太阳电池组件问世。

——1990年,世界太阳电池年产量超过46.5MW。

——1998年,世界太阳电池年产量超过151.7MW;多晶硅电池产量首次超过单晶硅。

——2000年,世界太阳电池年产量超过287.7MW,安装超过1000MW,标志太阳能时代到来。

——2007年,世界太阳电池年产量超过4400MW;中国太阳电池产量1088MW,超过欧洲(1062.8MWp),以微弱优势成为世界第一大太阳电池生产国。

——2008年,世界太阳电池产量约6850MW,而中国太阳电池产量约2570MW,占世界的37.5%,显居世界首位;世界完成装机容量超过5500MW,比2007年增加90%,其中欧洲占了约90%;中国仅安装了40MW,也就是接近98%的电池均为出口。

——2009年,中国政府启动闻名业界的“金太阳计划”,刺激光伏产业高速发展,全年安装140MW,为以前32年的总和,虽然如此,中国仍是世界第一的太阳电池生产大国,出口比例仍然高达96%,当然,各国均出台光伏扶持政策,140MW仅占世界同期装机容量的1.9%。

——2011年,全球光伏市场总装机达23.8GW,中国装机达到1.726GW,成为继意大利、德国、美国之后的光伏应用第四大

国,但持续多年“两头在外”的畸形发展,导致当美国“双反”和欧债危机发生时,整个2011年,全国光伏厂家有近70%倒闭或处于停产状态,近20%的厂家生产负荷不足50%;纵观全球,全年产能突破了79GW,产量为40GW,供需严重偏离。

——2012年,供需的严重偏离导致了2012年组件价格延续了2011年下跌的趋势,从年初的0.9美元/W下降到年底的0.65美元/W。经过2012年的洗礼,全球的光伏产能已降至70GW,产量39.4GW,但仍然高于31GW的新增装机。这标志着光伏制造整合大幕的拉开,也预示着整合的不断深入。中国太阳能电池产量仍位列世界首位,约为23GW,应用市场4.5~4.8GW的装机量占比16%,跃进为世界第二,意大利退居第四。

——2013年,纵观全球市场格局,2013年成为全球光伏市场发展的分水岭,欧洲光伏市场需求量的下滑和亚洲光伏市场需求量的上升。全球光伏市场中心从欧洲转向了亚洲,尤其是中国,完成了从制造大国到应用大国的完美转身。中国政府出台一系列光伏利好政策,促进光伏发电快速发展,促使年度新增光伏装机容量12.92GW,相对于全球36GW的装机容量,占比35.89%,一跃成为全球最大的太阳能市场。

——2014年,发生了标志着光伏发电有望在未来成为替代能源的重要事件:6月9日中午,德国光伏出力首次超过系统负荷的50%。说明电网可接纳光伏发电容量的能力远远超乎业内想象。

1.2.2 政策对太阳能光伏的影响力

作为21世纪最热门的新兴产业——新能源领域中的太阳能在政府的推动下迅猛发展,尤其在近5年时间,太阳能以平均每年50%~200%的增长速度飞速前进,没有哪一个领域像太阳能这样吸引着大量资本的进入。2000年以后,越来越多的国家制定了光伏相关政策,用以推动和控制这个行业的发展。这不是一个完全以市场行为、市场规律为导向的行业,没有政府规划、引导和政策鼓励,这个行

业可能会像2000年前后那样,在无电地区悄悄地发展着。正是因为政府把太阳能作为一个战略高度来规划,那么它的运势和走向或多或少都掌握在政府的手中。有专家说2020年太阳能光伏领域会通过自身技术的进步以及市场的优化配置,走上完全市场化的道路与常规能源赤膊竞争,政府财政不会再出钱补贴光伏市场。这应该是任何一个新兴产业发展成熟以后的必然趋势,但我们有理由相信,即便没有政府补贴资金,能源政策和能源规划,也离不开太阳能。

德国于2005年通过的《可再生能源法》决定对光伏进行上网电价补贴,吹亮了世界光伏产业发展的号角,2010年,德国宣布对光伏补贴下调,又引发了这一轮光伏投资的哀鸿遍野。放眼全世界,政府的政策对于光伏产业的影响何等的巨大?中国政府从2009年开始推出第一个针对太阳能光伏应用的政府资助政策:由住房和城乡建设部和财政部共同推出的“太阳能屋顶计划”,犹如一石惊浪,开启了太阳能光伏应用的黄金时代,其后被纳入能源局的“金太阳”政策中,持续三年对光伏在国内市场的应用进行初投资补贴,整个建设大潮历时5载,将2008年中国就开始占有的光伏制造大国的地位进一步推高到世界光伏应用大国的地位。虽然这个装机补贴政策实施中存在“挪用资金”、“以次充好”、“缺斤少两”等这样那样的问题。但无论如何,到2013年年底,受惠于“金太阳”政策的光伏项目的累计装机达到5GW,分布式光伏的应用技术得到了大幅度提高,积累了丰富的光伏工程经验,带动了国内光伏的上游制造产业,通过规模化降低了光伏应用的成本,造就了大批投身光伏领域的研发、技术、施工、检测等专业人才,无数的“第一”引领了世界光伏的发展。同时,也有利地促进了国家电网支持分布式光伏政策的出台,成功地将光伏发电的设备投资补贴转型到运行后的度电补贴、电费收益的商业模式,其承上启下的作用功不可没。

2014年,中国光伏应用全面进入到度电补贴时代,如同德国的光伏上网电价补贴政策一样,所有的目光全面聚集到光伏系统的发电

量产出。由此光伏市场出现了各种新的商业模式：众筹、BOT、融资租赁、电站证券化等；各类新型光伏构件：光伏瓦、真空光伏构件、有机光伏构件、柔性电池、蜂窝背板光伏构件等；系统各项性能的要求也被提到新高度：年发电量、系统寿命、防火与消防、监控平台、各种控制手段等。虽然很多资本对于分布式光伏电站的投资由于各种投资风险原因仍然处于观望状态，使得能源局年初制定的分布式完成8GW的目标成为泡影，但度电补贴的政策补贴机制推动了光伏的全面市场化和商业化。2015年具体政策也进行了进一步的微调，不难看出对分布式光伏系统的倾斜，使得大众有理由相信分布式会成为未来光伏以及可再生能源利用的重要市场。

1.3 光伏发电技术基础

1.3.1 光伏发电原理

半导体的导电性能介于金属和非金属之间。太阳能电池就是基于半导体材料光生伏

特效应（Photovoltaic effect）的一种直接把太阳辐射转化为电能的半导体器件。在以硅和锗为主的半导体材料中，截至目前，太阳能电池选择了地球上存量丰厚的硅为主要半导体材料。

硅是最常见的IV族半导体材料。周期表中的III族（如硼）和V族（如磷）原子以替换部分硅晶格中硅原子位置并保持硅晶体结构中有规律的原子排列的方式充当替位杂质进行掺杂。图1-7（a）所示是硅晶格的二维示意图。图1-7（b）是一个V族杂质磷原子替换了一个硅原子的部分晶格，与此类似，III族的硼原子没有足够的价电子来满足四个共价键，这就形成了一个束缚于硼原子的空缺的位置，即所谓的“空穴”，如图1-7（c）所示。用硼或其他III族原子掺杂的硅为 p （positive）型硅。

晶体硅太阳能电池作为第一代太阳电池，是以单晶硅片、多晶硅片为基础的单结同质结太阳电池，其基本结构实质是一个大面积平面 p - n 结二极管。 p - n 结，即为当硼掺杂的 p 型硅和磷掺杂的 n 型硅结合在一起时在两者的交界面处形成的内部电场。

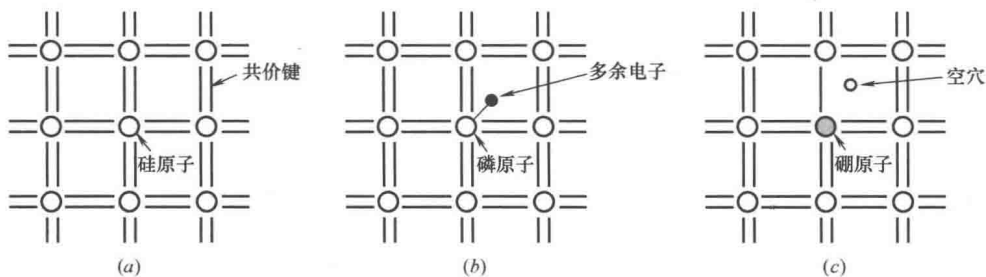


图 1-7 (a) 硅晶体晶格；(b) 一个磷原子替代了一个硅原子的部分硅晶格；
(c) 一个硼原子替代了一个硅原子的部分硅晶格

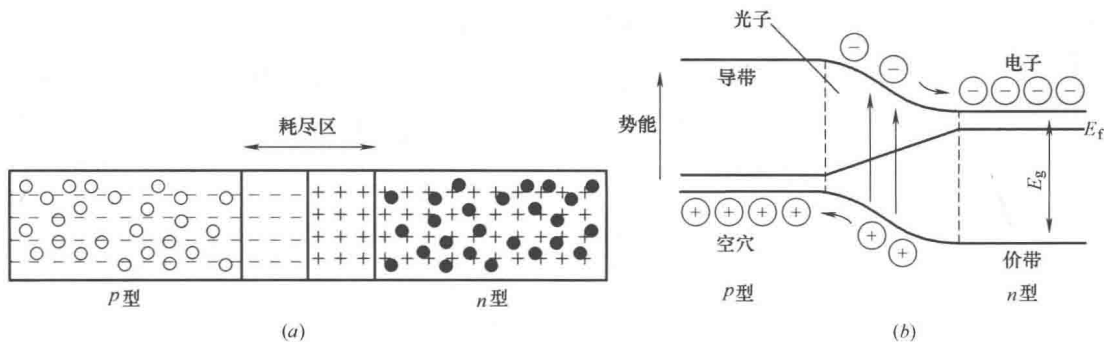


图 1-8 (a) 晶体硅太阳能电池的 p - n 结和耗尽区示意图；
(b) 光照情况下，晶体硅太阳能电池的 p - n 结能带图及载流子运动状况