

高等教育新能源类“十三五”规划教材

光伏物理与太阳电池技术

主 编 黄海宾 周 浪 岳之浩
袁吉仁 高 超 王 立



科学出版社

高等教育新能源类“十三五”规划教材

光伏物理与太阳电池技术

主 编 黄海宾 周 浪 岳之浩
袁吉仁 高 超 王 立

贵州师范学院内部使用

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从太阳能电池应用的角度出发,系统阐述半导体基础及光伏物理的相关知识,介绍太阳能电池器件设计的方法和注意事项;系统讲解了晶体硅、碲化镉等几种主流的太阳能电池材料和产品的特性及制造技术。本书尤其注重基础理论知识与生产实际的结合。

本书可作为高等院校新能源材料与器件专业、材料类专业、微电子类专业、固体物理类专业的本科和专科的相关专业课程的教材,以及太阳能光伏方向的硕博研究生的教学和研究参考书,也可作为太阳能光伏及相关领域的研发、生产和工程技术人员的学习参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

光伏物理与太阳能电池技术/黄海宾等主编. —北京:科学出版社,2019.10
高等教育新能源类“十三五”规划教材

ISBN 978-7-03-062632-5

I. ①光… II. ①黄… III. ①光生伏打效应-物理学-研究②太阳能电池-研究 IV. ①O482.3②TM914.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第228904号

责任编辑: 窦京涛 田轶静/责任校对: 杨聪敏

责任印制: 张 伟/封面设计: 迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京建宏印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年10月第一版 开本: 720×1000 B5

2019年10月第一次印刷 印张: 16 1/2

字数: 333 000

定价: 49.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

南昌大学光伏研究院的成立和建设发展几乎历经和见证了光伏技术发展的全程，特别是中国光伏业的历史性贡献。我们看到了二十年前曾被主流学术界认为已经成熟、没有研究前途、不能担当光伏电力平价上网大任的硅片太阳能电池的惊人发展：量产电池产品的平均能量转换效率从 13% 提高到了 23%！成本更是呈数量级地从 3 美元/峰瓦下降到了 0.3 美元/峰瓦！我们看到了无数的技术问题出现而后被解决，例如，PID 问题、PERC 电池光衰问题、PERT 电池制结工艺问题、金刚石切割多晶硅片制绒问题等，更有新型电池材料与设计的出现，如 TOPCon 电池、各种基于晶体硅衬底的异质结电池、结构改性的碲化镉电池等。这一切发展很快，很多最新进展都没有进入迄今为止出版的国内外光伏科学技术著作或教材。

本书尽可能包含所有太阳电池技术的最新重要进展，而且是一本兼具扎实物理基础和生动技术智慧的书，二者的关系可类比骨架与血肉。我们关注技术创新，其意义还不仅仅是让读者学习了解它们，更在于让读者从新的维度重温理论，加深理解，培育自己创新的土壤和种子！由于中国光伏产业和市场的压倒性主导格局，光伏技术的创新发展主导已责无旁贷地落到了中国光伏界的肩上，让我们共同努力！

2011 年南昌大学创办了以光伏技术为重点的新能源材料与器件专业，并获得了“卓越工程师培养计划”国家项目的支持。经过七年多的实践和不断改进，我们形成了一套较为完善的课程体系和教学内容，其中“光伏物理与太阳能电池技术”是其中一门核心主干课程。它是一门非常综合的课程，既是对前期基础教学内容的总结与延伸，又是对后期专业知识深入教学的基础与先导，连接科学与技术，起到了承上启下的作用。因此，这门课程对本专业学生专业素养与思维方式的培养与形成很关键。

在本书中，我们希望能同时做到“传道、授业”，让学生既能系统深入地学习光伏理论和知识，又能了解光伏前沿技术的进展、发展趋势以及技术与产业发展之道。本书的作者都是具有十余年光伏领域研发经验的资深研究人员，并且在过去的七年中每年拿出大量的时间到企业交流学习，了解最新行业和技术发展状况，分析企业对技术人员的要求，将这些不断融入教学中。

光伏技术日新月异，我们的教学内容也不断修改与完善，最终形成了本书的雏形，经过一年多的努力，终于成稿。在本书的撰写过程中，周浪主要负责第 2

章半导体物理基础、第 3 章光伏发电原理与太阳电池性能；黄海宾主要负责第 1 章绪论、第 4 章太阳电池设计和第 7 章 n 型晶体硅太阳电池技术，以及全书的编排校对；袁吉仁主要负责第 5 章新概念太阳电池；岳之浩主要负责第 6 章 p 型晶体硅太阳电池技术；高超主要负责第 8~10 章硅基薄膜、CdTe、CIGS 三种太阳电池技术；王立主要负责第 11 章 III-V 族化合物太阳电池技术。全书的构架、内容风格的确定由上述作者共同讨论商定。本书的编写过程得到了众多行业专家的帮助，包括杭州的龙焱能源科技(杭州)有限公司的吴选之先生、周洁博士，阿特斯阳光电力有限公司的杨超经理，江阴鑫辉太阳能有限公司的罗茂盛总监，晶科能源控股有限公司的张昕宇博士、杨洁博士，中智电力的徐昕博士、张闻斌博士等。南昌大学光伏研究院的宿世超、田罡煜、王涛、龚敏刚等硕士研究生在本书编写过程中帮忙查阅资料、修改图表。在此表示诚挚的感谢！本书编写的很多素材是我们多年教学过程中原始材料的积累，有一小部分材料已无法追寻到来源，未能引用出处，特此说明，敬请版权所有者见谅！本书获得南昌大学教材出版资助，在此表示感谢！

限于作者的认知范围和知识水平，本书难免有不足之处，敬请读者见谅！如能告知我等则更加感谢！我们将会在后继版本中修改完善。

周 浪

2019 年 1 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 太阳电池简介	1
1.2 太阳电池种类、技术发展现状及未来	3
1.3 太阳电池产业现状及未来	5
思考练习题	6
参考文献	6
第 2 章 半导体物理基础	7
2.1 引言	7
2.2 半导体中的电子与空穴	7
2.3 半导体掺杂效应	10
2.4 半导体中载流子的运输	14
2.5 半导体中的非平衡载流子	17
2.6 pn 结	23
2.7 半导体与光的相互作用	30
思考练习题	33
参考文献	34
第 3 章 光伏发电原理与太阳电池性能	35
3.1 引言	35
3.2 太阳电池发电原理与器件结构	36
3.3 太阳电池输出性能参数	40
3.4 太阳电池数学模型与应用——PC1D 软件介绍	45
3.5 太阳电池转换效率的局限与损失	50
3.6 本章小结	61
思考练习题	61
参考文献	61
第 4 章 太阳电池设计	63
4.1 引言	63
4.2 太阳电池器件结构设计原则	63
4.3 太阳电池材料属性与器件结构关系	66

4.4	太阳电池设计的光学特性考量	69
4.5	太阳电池设计的电学设计考量	75
4.6	太阳电池设计示例: a-Si:H/c-Si 异质结太阳电池	83
4.7	计算机辅助技术在太阳电池设计分析中的应用	85
	思考练习题	94
	参考文献	95
第5章	新概念太阳电池	96
5.1	引言	96
5.2	叠层太阳电池	99
5.3	多能带(能级)太阳电池	114
5.4	热载流子太阳电池	123
5.5	碰撞电离太阳电池	126
5.6	热光伏太阳电池	127
5.7	上下转换太阳电池	129
	思考练习题	129
	参考文献	130
第6章	p型晶体硅太阳电池技术	131
6.1	引言	131
6.2	p型晶体硅太阳电池发展概况	131
6.3	p-Al 背场晶体硅太阳电池结构及制造技术	132
6.4	p-PERC 晶体硅太阳电池结构及制造技术	149
6.5	p型晶体硅太阳电池及组件新技术简介	158
	思考练习题	163
	参考文献	164
第7章	n型晶体硅太阳电池技术	165
7.1	引言	165
7.2	n型晶体硅太阳电池特点及发展概况	165
7.3	n-HAC 晶体硅太阳电池结构及制造技术	168
7.4	n-PERT 晶体硅太阳电池结构及制造技术	182
7.5	n-IBC 晶体硅太阳电池结构及制造技术	187
7.6	其他 n 型晶体硅太阳电池结构简介	188
	思考练习题	191
	参考文献	191
第8章	硅基薄膜太阳电池技术	194
8.1	引言	194

8.2	非晶硅材料的特性	195
8.3	等离子化学气相沉积制备非晶硅薄膜	197
8.4	非晶硅合金材料	200
8.5	pin 结构的非晶硅电池	201
8.6	非晶硅太阳电池制备	203
	思考练习题	207
	参考文献	207
第 9 章	CdTe 太阳电池技术	209
9.1	引言	209
9.2	CdTe 材料性质	210
9.3	CdTe 材料的制备工艺	213
9.4	CdTe 太阳电池结构及制备	215
9.5	CdTe 太阳电池的产业化现状及发展趋势	218
	思考练习题	220
	参考文献	220
第 10 章	CIGS 太阳电池技术	221
10.1	引言	221
10.2	CIGS 材料特性	223
10.3	CIGS 材料的制备	229
10.4	CIGS 电池结构及其特性	234
10.5	CIGS 太阳电池未来的发展趋势	239
	思考练习题	241
	参考文献	241
第 11 章	III-V 族化合物太阳电池技术	243
11.1	引言	243
11.2	III-V 族化合物半导体材料的性质	243
11.3	典型 III-V 族化合物半导体太阳电池结构	246
11.4	III-V 族化合物半导体太阳电池制造技术	251
	思考练习题	253
	参考文献	253

第1章 绪 论

1.1 太阳能电池简介

人类文明的历史也是人类能源利用的发展史。从最初的利用大自然的“天火”，到后来的木炭、煤、石油、天然气，再到电能以及后来的核能、水能、风能等，种类不断丰富。如今，我们将所能利用的能源根据可再生的周期分为传统能源和可再生能源。可再生能源的意思是一种能源的消耗周期大于能源的再生周期，也就是说这种能源不会存在因使用而枯竭的问题。水能、风能均是可再生能源，而太阳能的供给量相对于人类的使用量来说几乎无穷无尽，所以也归为可再生能源。

广义上说，人类所用到的能源几乎全部来源于太阳，化石能源是太阳能的长周期存储方式，水、风的循环也是因为太阳辐射的地域和时间差异。但我们平时所讨论的太阳能一般是狭义的概念，是指直接利用来自太阳的能源，主要分为光热、光电两大类。光电又分为光热发电和光伏发电两种机理。前者是指聚集太阳能光发热，再将热量转变为电能的方式，一般是指太阳能加热产生水蒸气，推动发电机发电的方式。后者就是本书所要讲解的“太阳电池”，也称为太阳能电池或太阳能光伏电池。

太阳电池的基本工作原理为光生伏特效应。对于无机半导体类光伏电池，其工作原理为当太阳能照射到一个以 pn 结为核心的器件上后，半导体器件吸收太阳光转变为光生载流子，光生载流子在 pn 结内建电场的作用下产生电子和空穴的定向移动，最终在器件的两端形成一个电势差，如接上负载形成回路，则会产生电流，向外提供能源，如图 1-1 所示。作为一种先进的能源利用方式，太阳电池具有很多优点，包括：能量巨大、非枯竭、清洁、有阳光的地方即可使用；结构简单、无机械运转部分、无噪声、管理和维护简便、可实现系统自动化、无人化；可以阵列为单位选择容量；重量轻，可作为屋顶使用；制造所需能源少、建设周期短；适应发电场所的负载需要、不需输电线路等设备；等等。当然也有不足之处，例如，能量密度低、功率输出不稳定、随气象条件而变；直流电能、无蓄电功能等。

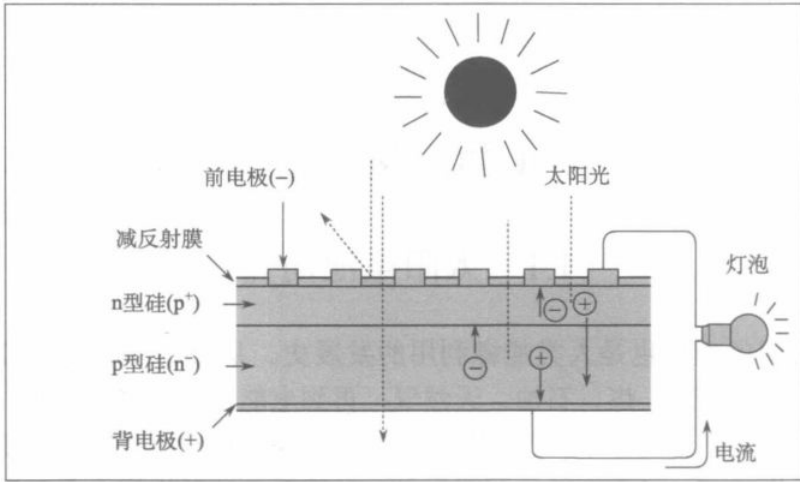


图 1-1 无机半导体类光伏电池发电基本原理示意图
以晶体硅太阳电池为例

人类对发现和认识光伏现象的历史很长，但真正走到应用的时间却并不长。1839 年法国实验物理学家贝克勒尔 (Becquerel) 发现液体的光生伏特效应。1904 年 Hallwachs 发现铜与氧化亚铜 (Cu/Cu₂O) 结合在一起具有光敏特性；德国物理学家爱因斯坦 (A. Einstein) 发表了关于光电效应的论文。1951 年生长 pn 结，实现制备单晶锗电池。1953 年 Wayne 州立大学 Dan Trivich 博士完成了基于太阳光谱的具有不同禁带宽度的各类材料光电转换效率的第一个理论计算。1954 年美国无线电公司 (RCA) 实验室的 P. Rappaport 等报道了硫化镉的光伏现象，贝尔 (Bell) 实验室研究人员 D. M. Chapin, C. S. Fuller 和 G. L. Pearson 报道了效率为 4.5% 的单晶硅太阳电池的发现。从此太阳电池真正开始了产品发展和应用之路。

1955 年美国西部电工 (Western Electric) 开始出售硅光伏技术商业专利，Hoffman 电子推出效率为 2% 的商业太阳电池产品，电池为 14mW/片，25 美元/片，相当于 1785 美元/峰瓦。1985 年单晶硅太阳电池售价 10 美元/峰瓦；2010 年通过技术突破，太阳电池成本进一步降低，在世界能源供应中占有一定的份额。德国可再生能源发电达到 12.5%。2012 年，光伏发电成本低于 1 元/度。现如今光伏组件的价格已经降到了约 2.6 元/峰瓦，在光照强度高的地区，光伏发电的价格优势已经可与火电竞争，达到了平价上网的要求。

如图 1-2 所示，在可预期的将来，太阳电池发电占整个能源利用构成的比例可能会越来越高，太阳电池的市场将会越来越大；在未来，太阳能发电的比例在能源利用中的比例将更高。

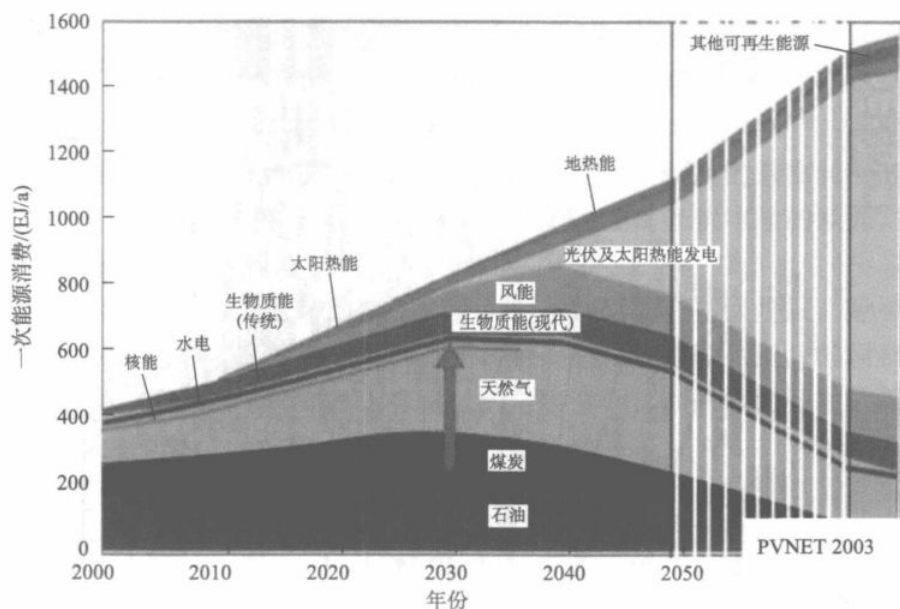
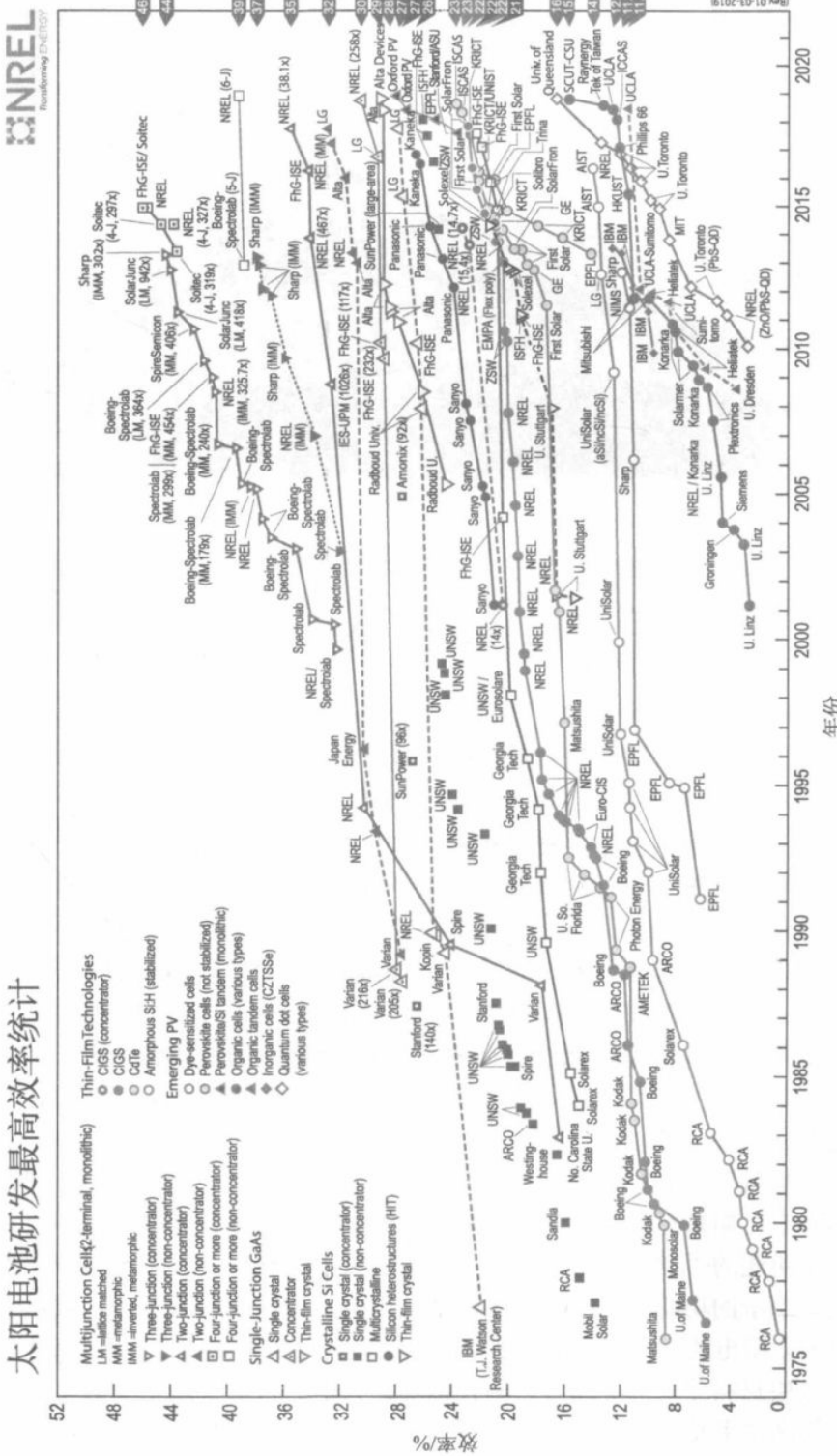


图 1-2 未来各类能源需求量预测

1.2 太阳能电池种类、技术发展现状及未来

在光伏电池近百年的发展史中，种类最为丰富、也最为成熟的是基于无机半导体材料的光伏电池，主要包括硅、碲化镉、III-V族化合物等。这些材料及由其构成器件的特性均适用于半导体物理相关理论。除此之外，还有基于有机半导体材料的一些光伏电池器件，主要是染料敏化太阳电池、有机半导体太阳电池和部分钙钛矿太阳电池等，这些材料体系是基于激发和导电的，它们的工作原理基本服从于半导体物理的相关知识，但略有差别。这两大类太阳电池目前发展得较为成熟，各有多种产品推出。基于这些材料和理论的光伏电池虽然性能上仍有很大的提升空间，但总地说来其理论转换效率较低，在地面应用只能达到30%左右。为了得到更高的转换效率，已经有研究人员在探索基于新的器件工作原理的太阳电池，包括热载流子太阳电池、杂质光伏电池、热光伏电池等，期望能将光电转换效率提升到60%甚至更高水平。这些研究目前都处于理论探索阶段，尚未得到合理的、高性能的器件结构。

在本书中，如果不做特殊说明，所指太阳电池均是基于无机半导体材料的太阳电池。这里所述的“材料”是指太阳电池中的吸收层材料，太阳电池中吸收光子转变为光生载流子的功能主要由它完成，是太阳电池最核心的部分，一般以吸收层的材料来命名太阳电池。比如说单晶硅太阳电池、碲化镉太阳电池、钙钛矿太阳电池，它们的吸收层材料分别是单晶硅、碲化镉和钙钛矿。目前一些主要的太阳电池的实验室制备最高效率发展状况如图1-3^[1]所示。图中所示转换效率均在(AM1.5G, 25℃)条件下测得。



晶体硅太阳能电池的研究历史最长，发展也最为成熟，目前其最高转换效率达到了 26.7%^[1]，已经很接近其转换效率极限 29%。III-V 族化合物太阳能电池的发展也非常迅速，其叠结结构转换效率是目前所有太阳能电池中最高的^[2]。除此之外，碲化镉、铜铟镓硒太阳能电池的发展也很快，除了实验室研发的最高转换效率一直提升外，生产技术也在不断进步中。钙钛矿太阳能电池是光伏电池的新秀，这几年飞速发展，短短四五年的时间，转换效率已经达到了 22.7%^[2]！

太阳能电池虽然已有近百年的发展历史，但目前仍处在初级阶段。除少数几种外，多数太阳能电池的转换效率距离其理论极限尚有巨大差距，现有的材料体系在器件结构设计、工艺方法等方面仍有巨大的进步空间，新材料的开发、新理论的研究创新也大有可为。

1.3 太阳能电池产业现状及未来

图 1-4 所示是 2000 年~2017 年间光伏电池技术快速发展的阶段，也是光伏电池市场快速扩张的阶段，这两方面带动了太阳能电池发电成本的急剧下降。三者良性循环，相互促进。经统计，2017 年全球光伏组件装机总量超过 70GW_p，累计装机容量超过 300GW_p，光伏组件价格已经降到了 2.6 元/峰瓦，近乎达到了平价上网的要求。预计在 2030 年装机容量将会超过 600GW_p。可以说是前景无限！

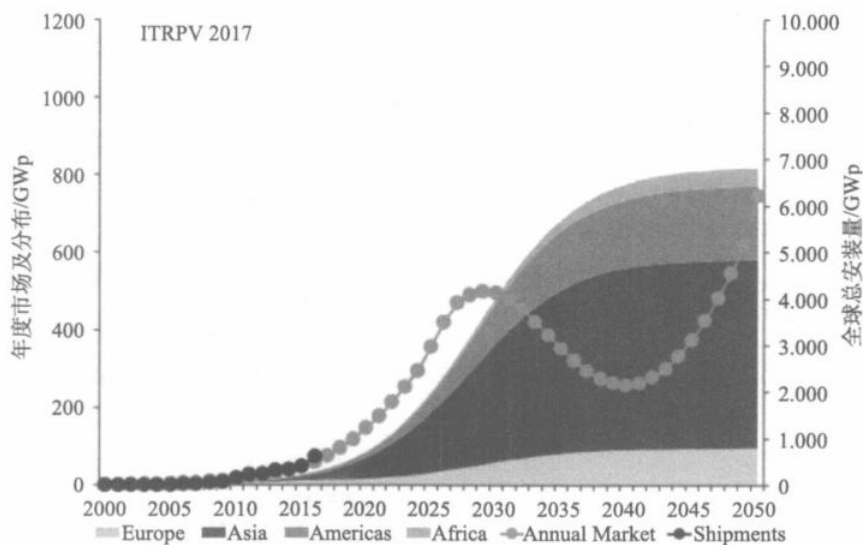


图 1-4 光伏市场安装量统计和未来发展预测

对于占市场绝对主导地位的晶体硅太阳能电池，各种优异的器件结构和制备技术都已相对成熟，过去的几年和未来的重点是生产技术的发展和大规模量产导入。

它在过去的近 20 年时间里走过了粗放发展阶段，逐步迈入了技术引领发展阶段。由初期的全部 Al 背场扩散 p 型晶体硅电池，逐步过渡到现在的 p 型 PERC、n-PERT、n-HJT 等多种技术共存、共同发展的阶段，终端市场也由单一的大型地面电站为主，发展为分布式、大型地面电站、光伏建筑一体化等多类别市场齐头并进的形式。

总体说来，光伏行业已经度过了婴儿期，进入了健康成长的少年期。已有的各种新技术不断导入生产。也期待在未来会有更多的优质创新性理论、材料和技术产生，推动光伏行业更加快速、优质地发展，造福全人类。

思考练习题

请查阅文献，了解光伏行业的历史和最新动态，谈谈自己对太阳能电池的理解和对产业发展的看法。

参 考 文 献

- [1] <https://www.nrel.gov/pv/>.
- [2] Green M A, Hishikawa Y, Dunlop E D, et al. Solar Cell Efficiency Tables(version 51). Progress in Photovoltaics Research and Applications, 2018, 26(1): 3-12.

第2章 半导体物理基础

2.1 引言

半导体材料和器件支撑着信息技术、半导体发光技术，也支撑着半导体光伏技术，现在已广泛渗透到人类社会生产和生活的各个方面。而半导体物理是支撑半导体材料和器件技术的主要理论基础，它是科学力量的精彩例证，也是现代科学发展历史中最令科学界自豪的篇章之一。

一般半导体物理教材篇幅数百页，内容庞杂，常令光伏行业技术人员望而却步；即使对于学习过半导体物理课程的学生来说，要从中抽出光伏物理的核心基础也非易事。作者从多年教学和产学研合作实践中深感有必要在本书中为读者提供这样一章基础内容。本章编写不是对已有半导体物理教材作一般的删减和简写处理，而是在消化理论及其光伏应用意义的基础上，紧扣光伏技术基本需要，以通俗易懂的方式重述半导体物理的智慧精华，简要而完整地介绍光伏技术所涉及的半导体物理基础。相对于一般半导体物理教材，本章省略的内容主要为三类：①与光伏技术无关的部分；②数学推导过程；③固体物理基础知识。然而对一些重要的、较难于理解的概念和结论，本章甚至还增加了定性的描述和解释来帮助读者理解；对重要的数学模型(计算公式)，本章会努力帮助读者去定性理解并掌握其运用；为便于读者查阅，本章还加入了一些重要的参考数据图表。对大多数概念及其应用我们都会以晶体硅为例来说明，而不求从一般理论出发抽象演绎，这样容易理解掌握，同时也学习了解了对光伏技术而言最为重要和主流的晶体硅半导体材料。为避免枯燥，作者在保证理论逻辑严谨的同时，插入了一些观点和评述，在关键知识点上加深读者印象。

对于费米能、声子(间接跃迁相关)等重要的基本概念，有意深究的读者可另行查阅固体物理书籍。

2.2 半导体中的电子与空穴

半导体的各种特性，包括其光电特性，甚至于它们本身的固相存在，都有赖于其中电子的状态特性。以最常用的半导体——晶体硅为例。硅原子相互结合形成晶体靠的是硅原子外层4个价电子与周边其他4个硅原子的各一个外层价电子

组合形成 4 个共价键；这种结合模式对每个硅原子都是等同的，都贡献出 4 个电子与周边 4 个原子共享，同时共享由这 4 个原子提供的 4 个电子，每个硅原子的外层电子轨道因此都得到饱和，能量降低，这也是它们共同组成稳定硅晶体的原因；如果晶体排列不出现缺陷，这种完美的键合排列将一直延续到表面——在表面将难免有一层原子得不到饱和。后面我们会知道，晶体内部排列缺陷也是难免的，完美结构在缺陷和表面处的中断都会对半导体的光伏应用性能有不良影响。

从几何要求上我们就可以理解，硅的这种键合形成的结构必定是空间对称的，满足这种要求的结构只有一种，如图 2-1 所示。它被称为金刚石结构，因金刚石中碳原子正是以这种结构排布而得名，事实上其形成机理也与硅十分相似。在这种结构排列的硅晶体中，原子密度为 $5 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$ 。

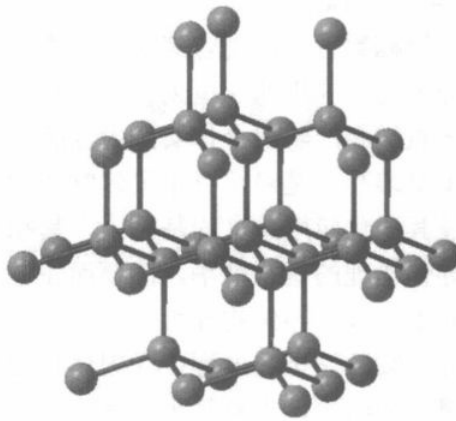


图 2-1 晶体硅原子排列结构示意图

图中连接硅原子之间的短线代表一个共价键，由被连接的两个硅原子各出一个价电子形成

理想情况下，纯硅晶体不会有任何导电能力，因为没有自由电子或任何其他载流子——所有外层电子都被束缚在共价键中。但这种理想情况只在绝对零度下具备。随温度升高，纯硅晶体导电能力会提高；在常温下其导电率介于绝缘体和金属之间，故被称为半导体。原因是热振动会使共价键中的电子激发而脱离束缚，成为可参与导电的自由电子；当然随温度升高，热振动加剧，发生这种电子激发的概率就会提高，从而导电率也相应提高。

固体能带理论使上述定性的认识得以提高到定量描述。图 2-2 是半导体价电子的能带结构示意图，以及半导体晶体中价电子的空间状态与其所处能带的对应关系。仍以硅为例，束缚于共价键中的电子能量较低，处于价带；脱离束缚的自由电子能量较高，处于导带。价带能量有明确的上限 E_v ，导带能量有明确的下限 E_c ；对半导体而言，在价带与导带之间有一个间隙，是电子不会在其中存在的一个能带，被称为禁带。这意味着电子从价带转变到导带（从共价键电子转变为自

由电子)的过程不会是连续过渡而是一种突变,被称为跃迁,或激发。电子跃迁所需的最小能量即为禁带宽度,即 $E_c - E_v$ 。图 2-2 在能量空间和晶体内部几何空间中同时示意出了这种跃迁,并标注其对应关系。绝对零度下电子将全部处于价带,非零温度下的热振动使电子有机会获得这个能量而跃迁到导带。

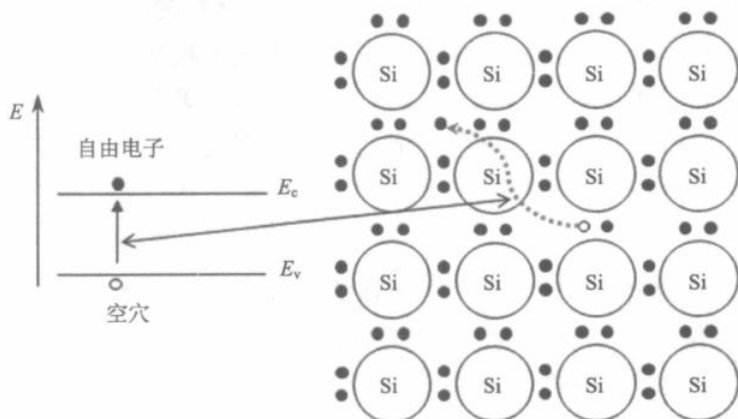


图 2-2 半导体价电子能带结构、跃迁及其与价电子在半导体内部空间状态对应关系示意图

禁带的宽度 E_g , 有时称带隙, 是一个十分重要的基本性质, 其大小决定了一种材料的电学、光学等多种物理性质。常见半导体带隙在 2eV 以下, 6eV 以上就是绝缘体了, 介于其间的则被称作宽带隙半导体。硅在常温下 $E_g = 1.12\text{eV}$, 随温度升高它会降低, 其关系已有较精确公式

$$E_g(T) = 1.17 - \frac{4.73 \times 10^{-4} T^2}{T + 636} \quad (2-1)$$

式中, T 为绝对温度, 所得 E_g 的单位为 eV 。

注意, 半导体中一个电子从价带跃迁到导带后, 导带上增加了一个电子, 同时价带上出现了一个电子空穴(共价键上缺一个电子)。将空穴看作一种带电粒子(其电荷大小与电子电荷相同, 符号与电子电荷相反), 理论逻辑上正确, 分析操作上则方便很多。自由电子与空穴都被称为载流子。空穴的迁移运动机制与一般粒子不同, 它不是独立自主地迁移, 而是以半导体中相邻价带电子与之互换位置的方式迁移, 表观上体现为其迁移率明显低于自由电子在半导体中的迁移率, 对晶体硅而言, 空穴迁移率约为自由电子的 $1/3$ 。

半导体在一定温度下的平衡载流子浓度显然将随温度提高、禁带宽度减小而升高, 具体定量关系可由费米-狄拉克分布导出如下:

$$n_0 = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{k_0 T}\right) \quad (2-2)$$