

激光技术与太阳能电池

王 月 王 彬 王春杰 著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2018

前 言

随着现代工业的飞速发展，能源危机和大气污染等问题日益突出。由于不可再生能源的减少和环境污染的双重压力，光伏产业得到了迅猛发展。目前，光伏产业包括两大技术路线：晶硅电池和薄膜电池。晶硅太阳能电池是目前技术最成熟、商业化程度最高的产品，市场占有率已经达到90%以上。而对薄膜太阳能电池的技术研究一直处于探索阶段，但经过近几十年的研究也获得了丰硕的成果。太阳能电池的发展趋势是转化效率逐渐提高、成本逐渐降低，并且应用领域也在不断地扩大，总产量也在不断地增加。

我国有丰富的太阳能源，光伏发电具有巨大的潜力，而且我国目前已经在国际光伏产业上占有重要的一席之地。目前，综合来看，晶体硅太阳能电池仍然是主体，晶体硅太阳能电池具有较为成熟的制作工艺，转化效率不断提高，制作成本大幅度降低，所以在未来的一段时间内，晶体硅太阳能电池仍然是光伏主流产品。

随着激光技术的不断发展，激光设备已解决各个领域通过普通工艺无法完成的技术难题，在各种激光器中，固体激光器具有结构牢固、稳定性强、良好的热性能和力学性能等优点，尤其适用于加工太阳电池。利用固体激光器制备局部背接触太阳电池能够满足工业生产对成本低廉且电池性能优良的需求。但不恰当的使用也会对电池造成损伤，若激光能量过大会使多余的热量传递至硅基底从而改变硅表面微结构。若输出能量过小，则会导致背

沉积层不能被移除, 电池串联电阻大, 影响电池光电转换效率。因此降低激光器对硅片的损伤, 对于提高太阳电池效率具有重要意义。

本书内容涵盖了太阳能电池的基本工作原理与分类, 固体激光器的工作原理、分类以及制备太阳能电池的理论分析, 以及激光器对太阳能电池效率的影响等内容。全书分为6章: 第1章介绍了太阳能电池的研究背景, 包括太阳能电池的发展现状以及新趋势; 第2章介绍了晶硅太阳能电池原理及分类, 侧重点是太阳能电池的原理和结构, 以及相关参数和影响因素等; 第3章介绍了太阳能电池的分类, 详细介绍了目前几种主流太阳能电池的发展和现状以及几种新型太阳能电池的发展情况; 第4章介绍了固体激光器, 详细介绍了固体激光器的组成、工作原理、分类以及Nd:YAG激光器等; 第5章介绍了固体激光器制备太阳能电池的应用及影响因素, 同时还介绍了激光掺杂和表面织构化等相关内容; 第6章介绍了固体激光器对电池效率的影响, 侧重点是通过优化激光器的工作参数研究激光器的功率、速度对硅片的影响。

本书在编写过程中参考了大量的著作和文献资料, 无法全部列出, 在此谨向作者致以谢意。

随着太阳能电池技术的飞速发展, 本书在编写过程中可能存在不足之处, 同时书中的研究方法和结论也有待更新和更正。由于编者知识面、水平以及掌握的资料有限, 书中难免有不当之处, 欢迎各位读者批评指正。

作 者

2018年1月

目 录

1 绪论	1
1.1 太阳能发展历程	3
1.1.1 早期的太阳能利用	3
1.1.2 工业化太阳能的利用	3
1.1.3 中国近代太阳能的利用兴起	3
1.1.4 世界范围内开发利用太阳能热潮	4
1.1.5 开发利用太阳能成为主流趋势	4
1.1.6 太阳能电池发展进程	5
1.2 太阳能发电的优势与不足	6
1.2.1 太阳能发电的优点	6
1.2.2 太阳能发电的缺点	7
1.3 太阳能发电现状与发展前景	7
1.3.1 太阳能电池的生产与应用	7
1.3.2 光伏产业飞速发展	7
1.4 中国太阳能发电现状与发展前景	9
1.4.1 中国太阳能资源非常丰富	9
1.4.2 中国太阳能光伏产业发展	9
1.4.3 中国太阳能光伏产业发展强劲	10
1.4.4 我国太阳能电池发展的主要问题及解决办法	11
1.5 太阳能电池的新技术与新动态	13
1.5.1 大力发展多晶硅	13
1.5.2 减少硅片厚度	14
1.5.3 发展薄膜电池	14
1.5.4 太阳能采集新装置——氦气球	14
1.5.5 新材料与新工艺不断出现	15
参考文献	17
2 晶硅太阳能电池原理及分类	19
2.1 金属与半导体导电机理	19

2.1.1	自由电子	19
2.1.2	金属导电率	19
2.2	晶硅电池的原理	20
2.2.1	半导体导电机理	20
2.2.2	半导体二极管的物理特性	22
2.2.3	半导体的能带结构	23
2.3	P型和N型半导体	24
2.3.1	P型半导体	24
2.3.2	N型半导体	24
2.4	PN结	25
2.4.1	扩散运动与漂移运动	25
2.4.2	PN结的导通和截止	26
2.4.3	光电导	27
2.4.4	PN结的光生伏特效应	28
2.5	常规晶硅电池结构及工艺研究	30
2.5.1	表面织构化	31
2.5.2	扩散制 PN^+ 结	32
2.5.3	去除边缘 PN^+ 结和去除磷硅玻璃	33
2.5.4	镀膜	33
2.5.5	丝网印刷电极	33
2.5.6	银电极	34
2.5.7	铝背场	34
2.5.8	烧结	34
2.6	太阳能电池相关参数	35
2.6.1	标准测试条件	35
2.6.2	太阳能电池的等效电路	36
2.6.3	太阳能电池的主要技术参数	37
2.7	影响电池效率的一些因素	42
2.7.1	光吸收率	42
2.7.2	带隙类型	43
2.7.3	载流子寿命	43
2.7.4	光照强度	43
2.8	提高太阳能电池效率的方法	44
2.8.1	最大功率跟踪	44
2.8.2	聚光	46

参考文献	51
3 太阳能电池的分类	54
3.1 按基体不同分类的太阳能电池	54
3.1.1 单晶硅太阳能电池	54
3.1.2 多晶硅太阳能电池	56
3.1.3 非晶硅薄膜太阳能电池	57
3.2 按材料不同分类的太阳能电池	58
3.2.1 多晶硅薄膜太阳能电池	58
3.2.2 微晶硅太阳能电池	59
3.2.3 HIT 太阳能电池	60
3.2.4 有机聚合物太阳能电池	60
3.2.5 染料敏化太阳能电池	64
3.2.6 量子点敏化太阳能电池	67
3.2.7 无机半导体纳米晶薄膜太阳能电池	69
3.2.8 钙钛矿太阳能电池	75
3.3 按电池结构分类的太阳能电池	79
3.3.1 同质结太阳能电池	79
3.3.2 异质结太阳能电池	79
3.3.3 肖特基结太阳能电池	79
3.3.4 复合结太阳能电池	79
3.4 新型太阳能电池	80
3.4.1 纳米晶太阳能电池	80
3.4.2 叠层太阳能电池	80
3.4.3 柔性太阳能电池	81
参考文献	81
4 固体激光器	84
4.1 固体激光器的基本组成及工作原理	84
4.1.1 工作物质	85
4.1.2 泵浦系统	85
4.1.3 聚光系统	86
4.1.4 光学谐振腔	87
4.1.5 冷却与滤光系统	87
4.2 固体激光器的应用	88

4.2.1 军事国防	88
4.2.2 医疗美容	89
4.3 固体激光器的分类	89
4.3.1 可调谐近红外固体激光器	90
4.3.2 可调谐紫外 Ce^{3+} 激光器	92
4.3.3 可调谐中红外 Cr^{2+} 激光器	92
4.3.4 铽激光器	92
4.3.5 掺钛蓝宝石激光器	92
4.4 高功率灯泵浦固体激光器的研究	94
4.4.1 光学谐振腔的研究	96
4.4.2 激光介质热效应的研究	107
4.5 Nd:YAG 激光器	117
4.5.1 Nd:YAG 晶体结构、物理性能和激光特性 ^[16]	119
4.5.2 Nd:YAG 激光棒	123
4.5.3 Nd:YAG 激光器的理论分析	126
参考文献	128
 5 利用固体激光器制备太阳能电池的理论分析及应用	 130
5.1 激光器制备电池的理论分析	131
5.1.1 激光产生的理论基础	131
5.1.2 固体激光器加工系统	134
5.1.3 激光与材料的相互特性	134
5.2 基于固体激光器加工晶硅太阳能电池	136
5.2.1 激光加工技术在硅太阳能电池中的应用	136
5.2.2 激光加工技术在薄膜太阳能电池中的应用	139
5.2.3 连续激光电源输出电流对划片的影响分析	142
5.2.4 声光 Q 电源输出频率对划片的影响分析	143
5.2.5 声光 Q 电源输出脉宽对划片的影响分析	145
5.2.6 激光扫描速度/工作台移动速度对划片的影响分析	146
5.2.7 激光器光学系统出光光斑直径对划片的影响分析	148
5.3 激光掺杂选择性发射极太阳能电池	151
5.3.1 选择性发射极	153
5.3.2 激光掺杂工艺对硅片方阻的影响	156
5.3.3 激光掺杂工艺对电池外量子效率的影响	157
5.3.4 激光掺杂工艺对电池光电转换效率的影响	158

5.3.5 激光掺杂工艺致使电池失效的分析	159
5.4 利用激光制备硅太阳能电池表面织化结构	160
5.4.1 表面织构	161
5.4.2 表面织构的减反射原理	162
5.4.3 激光表面织构技术	163
5.4.4 单晶硅电池绒面织构技术	164
5.4.5 多晶硅电池绒面织构技术	165
5.4.6 激光表面织构技术的发展	167
5.5 固体激光器在非晶硅太阳能电池中的应用	168
5.5.1 非晶硅薄膜太阳能电池结构和制备工艺	169
5.5.2 非晶硅薄膜太阳能电池激光刻线系统	171
5.5.3 脉冲激光对非晶硅薄膜晶化现象的影响	177
5.5.4 非晶硅薄膜太阳能电池激光除边工艺研究	180
5.5.5 激光专用机在非晶硅太阳能电池制备中的应用	182
参考文献	185
6 固体激光器对电池效率的影响	187
6.1 优化激光工作波长	187
6.2 优化固体激光器工作参数	189
6.2.1 通过数值计算分析高斯光束焦点	189
6.2.2 通过实验探索高斯光束焦点	191
6.3 探索固体激光器功率对硅片的影响	194
6.4 探索固体激光器速度对硅片的影响	206
6.5 探索固体激光器脉冲重复频率对硅片的影响	211
6.6 总结	213
参考文献	214

1 绪 论

能源是现代社会发展的动力与基石。进入 21 世纪后,随着全球经济的飞速发展,各国对能源的需求也与日俱增。与此同时,如何实现可持续发展也是人类面临的紧迫问题。化石能源的大量使用带来的全球变暖、大气污染等问题日益严重。这是人类实现人与自然和谐可持续发展进程中的重大挑战^[1]。

不可再生的化石能源储量日益枯竭,根据 BP 在 2016 年发布的 BP 世界能源统计年鉴(BP Statistical Review of World Energy 2016)中发布的数据^[2],2015 年末,世界石油储量为 17000 亿桶,2014 年日均开采量则为 8867.3 万桶,如按照此速率持续开采并未能在将来发现大规模的新油田,则石油将在 52 年之后彻底枯竭^[3]。图 1-1 为目前世界及中国能源结构现状,从图中可知,目前的能源主要还是以原煤和原油为主体。然而这些能源的日渐枯竭已经成为现代社会发展的拦路虎。

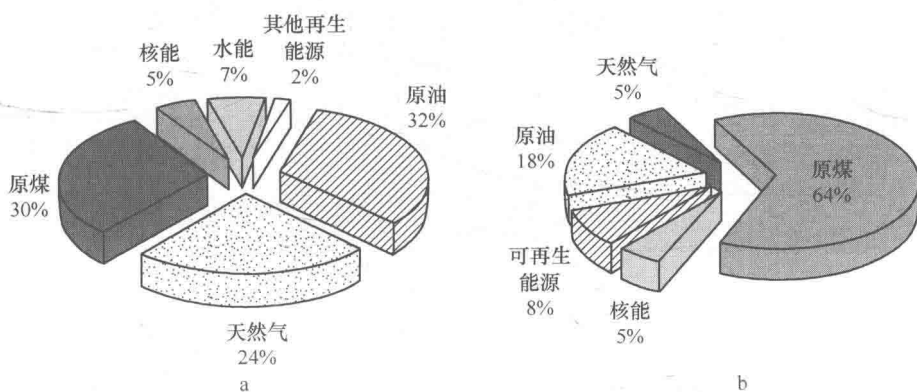


图 1-1 世界 (a) 及中国 (b) 能源结构现状

在这种严峻的形势下,尽快开发和利用可再生清洁能源已成为各国能源战略中的重中之重。太阳能、风能、水能、核能、生物能等是人类现阶段已探明可大规模利用的清洁能源。众所周知,太阳能是一种取之不尽、用之不竭的清洁能源,储量巨大。当前世界面临资源、环境、饥饿与贫穷的挑战,在寻求人类社会可持续发展的进程中,太阳能的利用逐渐得到各国政府的重视。德国气候变迁委员会预测,太阳能在未来的能源结构中所占的比例将越来越大,到 2100 年可达

到 70%^[3]。太阳能作为一种高效、无污染、遍及全球的可再生资源，目前已逐渐被各行各业所利用。这对缓解全球能源紧张状况，控制大气污染与全球温室化效应，同时提高各国人民的生活质量，具有非常重要的意义^[4]。

据欧洲光伏工业协会 EPIA 预测，太阳能光伏发电在 21 世纪会占据世界能源消费的重要席位（图 1-2），不但要替代部分常规能源，而且将成为世界能源供应的主体。预计到 2030 年，可再生能源在总能源结构中占到 30% 以上，而太阳能光伏发电在世界总电力供应中的占比也将达到 10% 以上；到 2040 年，可再生能源将占总能耗的 50% 以上，太阳能光伏发电将占总电力的 20% 以上；到 21 世纪末，可再生能源在能源结构中占到 80% 以上，太阳能发电将占到 60% 以上^[4,5]。这些数字足以显示出太阳能光伏产业的发展前景及其在能源领域重要的战略地位。

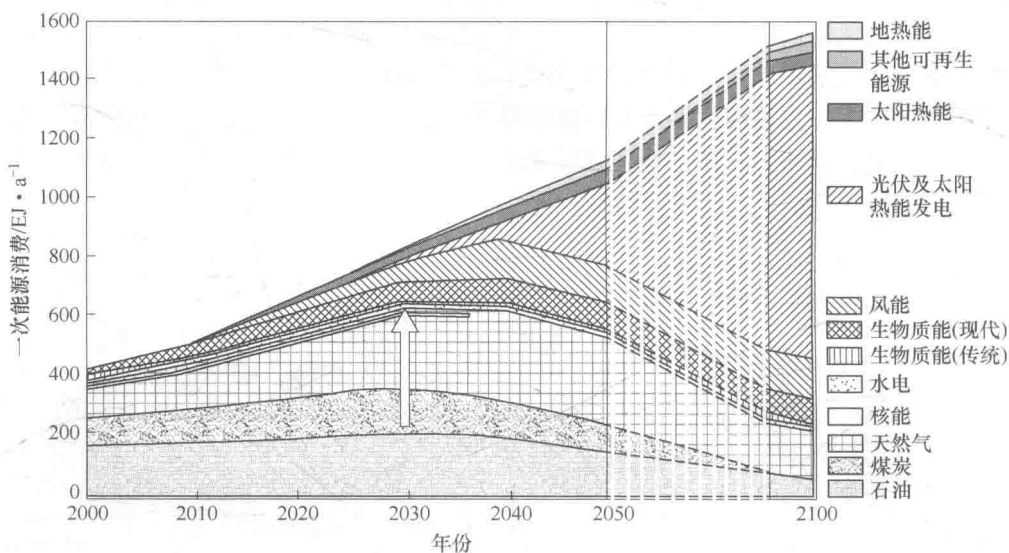


图 1-2 未来世界能源结构变化

地表的风能、水能、生物质能，地下的石油、天然气、煤炭等化石能源，从根本来说都是太阳的辐射能。广义上的太阳能范畴很大，狭义上的可利用的太阳能则基本分为太阳辐射能的光热、光电、光化学的直接转换^[6-8]。太阳能光电转换技术是将太阳能通过光电转换器转换成电能，这也就是被大家所熟知的光伏发电。从长远的观点看，太阳能作为新能源和可再生能源之一，因为清洁环保、永不衰竭的特点，受到世界各国的青睐。充分利用太阳能，对于替代常规能源，保护自然环境，促进经济可持续发展具有极为重要的现实意义和深远的历史意义。

1.1 太阳能发展历程

1.1.1 早期的太阳能利用

人类利用太阳能已有 3000 多年的历史。将太阳能作为一种能源和动力加以利用,只有 300 多年的历史。近代太阳能利用历史可以从 1615 年法国工程师所罗门·德·考克斯在世界上发明第一台太阳能驱动的发动机算起,该发明是一台利用太阳能加热空气使其膨胀做功而抽水的机器。在 1615 ~ 1900 年之间,世界上又研制成多台太阳能动力装置和一些其他太阳能装置。这些动力装置几乎全部采用聚光方式采集阳光,发动机功率不大,工质主要是水蒸气,价格昂贵,实用价值不大,大部分为太阳能爱好者个人研究制造^[9]。

1.1.2 工业化太阳能的利用

在第二次世界大战结束后的 20 年中,一些有远见的人士已经注意到石油和天然气资源正在迅速减少,呼吁人们重视这一问题,从而逐渐推动了太阳能研究工作的恢复和开展,并且成立太阳能学术组织,举办学术交流和展览会,再次兴起太阳能研究热潮。1952 年,法国国家研究中心在比利牛斯山东部建成一座功率为 50kW 的太阳炉。1960 年,在美国佛罗里达建成世界上第一套用平板集热器供热的氨-水吸收式空调系统,制冷能力为 5 冷吨。1961 年,一台带有石英窗的斯特林发动机问世。在这一阶段里,加强了太阳能基础理论和基础材料的研究,取得了如太阳选择性涂层和硅太阳能电池等技术上的重大突破。平板集热器有了很大的发展,技术上逐渐成熟^[10,11]。

1.1.3 中国近代太阳能的利用兴起

1975 年,在河南安阳召开“全国第一次太阳能利用工作经验交流大会”,进一步推动了我国太阳能事业的发展。这次会议之后,太阳能研究和推广工作纳入了我国政府计划,获得了专项经费和物资支持。一些大学和科研院所,纷纷设立太阳能课题组和研究室,有的地方开始筹建太阳能研究所。当时,我国也兴起了开发利用太阳能的热潮。

在全球倡导低碳经济的今天,太阳能作为一种清洁的可再生能源,越来越受到各国政府的重视。目前太阳能光伏发电的成本是燃煤的 11 ~ 18 倍,因此各国太阳能电池产业的发展大多依赖政府补贴,补贴的规模决定着该国太阳能电池产业的发展规模。在政府补贴力度上,德国、西班牙、法国、美国、日本等发达国家最大。2008 年,西班牙推出了优厚的太阳能电池产业补贴政策,使其国内太阳能电池产业出现了爆发式发展,一度占据了世界太阳能电池产量的前三强。2009 年德国太阳能电池组件安装量高达 3200MW,占全球总安装量的 50.4%。

在各国政府的大力支持下,太阳能电池产业得到了快速发展。2006~2009年,全球太阳能电池产量的年均增长率为60%。由于受到金融危机的影响,2009年上半年太阳能电池产量的增速有所放缓,随着下半年市场的复苏,全年太阳能电池产量达到了10431MW,比2008年增长42.5%^[12]。

目前,我国已形成了完整的太阳能电池产业链。国内从事光伏产业的企业数量达到580余家,从业人数约30万。2009年,我国多晶硅、硅片、太阳能电池和组件产能分别占据全球总产能的25%、65%、51%和61%,太阳能电池产量也占了总产量的4成以上,太阳能光伏产业出口创汇金额约为158亿美元。从产业布局上来看,国内的长三角、环渤海、珠三角及中西部地区已形成了各具特色的区域产业集群,并涌现出了无锡尚德、江西赛维、天威英利等一批知名企业。2007年我国成为太阳能电池第一生产大国^[13]。预计2010年中国太阳能电池产量达到8000MW,约占全球总产量一半,居世界首位。山东、江苏、陕西、甘肃、青海、宁夏及海南省已经将太阳能电池产业的发展列入地方发展规划。目前国内太阳能电池市场规模较小,国内生产的产品90%以上靠出口。这种过度依赖出口的产业发展模式易受国际需求变化的影响,增加了行业经营风险。在2008年的全球金融危机中,因西方国家削减了光电产品价格补贴,直接导致了我国许多太阳能电池企业的倒闭^[14]。

1.1.4 世界范围内开发利用太阳能热潮

20世纪70年代兴起的开发利用太阳能热潮,进入80年代后不久开始落潮,逐渐进入低谷。世界上许多国家相继大幅度削减太阳能研究经费,其中美国最为突出。导致这种现象的主要原因是:世界石油价格大幅度回落,而太阳能产品价格居高不下,缺乏竞争力。核电发展较快,对太阳能的发展起到了一定的抑制作用。由于需要大量燃烧矿物能源,造成了全球性的环境污染和生态破坏,对人类的生存和发展构成威胁。在这样的背景下,1992年联合国在巴西召开“世界环境与发展大会”,会议通过了《里约热内卢环境与发展宣言》,这次会议之后,世界各国加强了清洁能源技术的开发,将利用太阳能与环境保护结合在一起,使太阳能利用工作走出低谷,逐渐得到加强。尽管如此,从总体来看,20世纪取得的太阳能科技进步仍比以往任何一个世纪都大^[15~17]。

1.1.5 开发利用太阳能成为主流趋势

在生存环境破坏严重、能源日益紧缺的今天,如何开发环保能源成为一个全球性话题。太阳能作为一种免费、清洁的能源,受到世界各国的重视,不断有大型太阳能电站涌现,而且不断有国家声称要建成世界上最大的太阳能电站。目前世界上太阳能发电技术日趋成熟,截止到2008年年底全球共安装了超过1700个

太阳能发电站,平均大小为 200kW。累加的太阳能发电总量已经超过 3200MW。截至 2008 年,有大约 800 个太阳能发电站运行或试运行,规模都大于 1MW。最新的世界能源统计资料表明,太阳能发电产业在最近 5 年的年均增长速度超过 30%。

改善太阳能电池的性能,降低制造成本以及减少大规模生产对环境造成的影响是未来太阳能电池发展的主要方向。作为太阳能电池材料,其中^[18]:

(1) 由于多晶硅和非晶硅薄膜电池具有较高的转换效率和相对较低的成本,将最终取代单晶硅电池,成为市场的主导产品;

(2) III-V 族化合物及 CIS 等属于稀有元素,尽管转换效率很高,但从材料来源看,这类太阳能电池不可能占据主导地位;

(3) 有机太阳能电池对光的吸收效率低,从而导致转换效率低;

(4) 染料敏化纳米 TiO_2 薄膜太阳能电池的研究已取得喜人成就,但还存在如敏化剂的制备成本较高等问题。

另外目前多沿用液态电解质,但液态电解质存在易泄漏、电极易腐蚀、电池寿命短等缺陷,使得制备全固态太阳能电池成为一个必然方向。目前,大部分全固态太阳能电池光电转换率都不是很理想。纳米晶太阳能电池以其高效、低价、无污染的巨大优势挑战未来。人们相信,随着科技发展以及研究推进,这种太阳能电池应用前景广阔无限。

1.1.6 太阳能电池发展进程

1.1.6.1 第一代太阳能电池

第一代太阳能电池包括单晶硅太阳能电池和多晶硅太阳能电池。从单晶硅太阳能电池发明开始到现在,尽管硅材料有各种问题,但仍然是目前太阳能电池的主要材料,其比例约占整个太阳电池产量的 90% 以上。我国北京市太阳能研究所从 20 世纪 90 年代起开始进行高效电池研究,采用倒金字塔表面织构化、发射区钝化、背场等技术,使单晶硅太阳能电池的效率达到了 19.8%。

1.1.6.2 第二代太阳能电池

第二代太阳能电池是基于薄膜材料的太阳能电池。薄膜技术所需的材料较晶体硅太阳能电池少得多,且易于实现大规模生产。薄膜电池主要有非晶硅薄膜电池、多晶硅薄膜电池、碲化镉以及铜铟硒薄膜电池。我国南开大学于 20 世纪 80 年代末开始研究铜铟硒薄膜电池,目前在该研究领域处国内领先、国际先进地位。其制备的铜铟硒太阳能电池的效率已经超过 12%。铜铟硒薄膜太阳能电池的试生产线亦已建成。我国在染料敏化纳米薄膜太阳能电池的科学研究和产业化研究上都与世界研究水平相接近。我国在染料敏化剂、纳米薄膜修饰和电池光电效率上都取得与世界相接近的科研水平,在该领域具有一定的影响力。

1.1.6.3 第三代太阳能电池

第三代太阳能电池必须具有以下条件：薄膜化，转换效率高，原料丰富且无毒。目前第三代太阳能电池还在进行概念和简单的试验研究。已经提出的第三代太阳能电池主要有叠层太阳电池、多带隙太阳能电池等。虽然太阳能电池材料的研究已到了第三个阶段，但是在工艺技术的成熟程度和制造成本上，都不能和常规的硅太阳能电池相提并论。硅太阳能电池的制造成本经过几十年的努力终于有了大幅度的降低，但是与常规能源相比，仍然比较昂贵，这又限制了它的进一步大规模应用。鉴于此点，开发低成本、高效率的太阳能电池材料仍然有很长的路要走^[19,20]。

1.2 太阳能发电的优势与不足

1.2.1 太阳能发电的优点

太阳能发电具有如下优点^[21]：

(1) 能源巨大。太阳能是巨大的无污染的可再生能源，每天送到地球表面的辐射能大约相当于 2.5 亿万桶石油。太阳是一个巨大无尽的洁净能源中心，在太阳内部进行的由“氢”到“氦”核聚变反应已经持续了几十亿年，其向宇宙空间辐射的能量功率为 3.8×10^{15} 亿千瓦，其中 22 亿分之一到达地球大气层，30% 被大气层反射，23% 被大气层吸收，其余的到达地球表面，其功率为 8.0×10^5 亿千瓦，也就是说太阳每秒照射到地球上的能量就相当于燃烧 500 万吨煤释放的热量。

(2) 能量长久。太阳的寿命还有上百亿年，太阳能是“取之不尽，用之不竭”的能源库。地球上的风能、水能、海洋温差能、波浪能和生物质能以及部分潮汐能都是来源于太阳，即使是地球上的化石燃料（如煤、石油、天然气等）从根本上说也是远古以来贮存下来的太阳能。因此广义的太阳能所包括的范围非常大，狭义的太阳能则限于太阳辐射能的光热、光电和光化学的直接转换。开发利用太阳能，使之成为能源体系中重要的替代能源可以说是人类能源战略上的终极理想。

(3) 分布广泛。太阳光普照地球，无论陆地、海洋、高山和海岛。处处都有阳光普照，不受地域的限制，只要需要，就可开发和利用，不需要开采、运输和输送。

(4) 没有污染。开发利用太阳能不会污染环境，没有任何废弃物，没有噪声，是理想的最清洁的能源。

(5) 成本低廉。太阳能发电不需要燃料，没有运动部件，不易损坏，维护简单，运行成本低廉。

(6) 建设周期短。太阳能发电建设周期短,变化灵活,节约建设时间和减少工程量,容易增加或减少容量,避免浪费。

1.2.2 太阳能发电的缺点

太阳能发电具有如下缺点^[21]:

(1) 能量密度低。太阳辐射到地球表面的太阳能总量大,但是照射的能量分布密度小,正午时分地面上在垂直于太阳光方向 1m^2 面积上接收到太阳能平均有 1000W 左右,按全年日夜平均只有 200W 左右。因此利用要占很大的面积。

(2) 不稳定性。地面获得太阳能辐射具有间歇性和随机性,主要受到四季、昼夜、地理纬度和海拔高度等自然条件的限制以及晴、阴、云、雨等气候条件的影响。

(3) 效率低,价格高。目前太阳能开发与利用处于发展阶段,理论可行,技术成熟。但是,太阳能利用装置的效率还不高,价格较贵,为常规发电的 5 ~ 15 倍,生物质发电(沼气发电)的 7 ~ 12 倍,风能发电的 6 ~ 10 倍,经济性不能与常规能源相竞争。但太阳能与其他新能源相比在资源潜力和持久适用性方面更具优势,从长远前景来看,光伏发电是最具潜力的战略替代发电技术。随着科技创新与技术的发展,这个状况会逐渐改善。

1.3 太阳能发电现状与发展前景

1.3.1 太阳能电池的生产与应用

早在 1839 年,法国科学家贝克雷尔(Becquere)就发现,光照能使半导体材料的不同部位之间产生电位差。这种现象后来被称为“光生伏打效应”,简称“光伏效应”。1954 年,美国科学家恰宾和皮尔松在美国贝尔实验室首次制成了实用的单晶硅太阳能电池,第一个太阳能电池的效率为 6%,经过改进,效率达到了 10%,并于 1958 年装备于美国的先锋 1 号人造卫星上,成功地运行了 8 年。开始了将太阳光能转换为电能的实用光伏发电技术。20 世纪 70 年代以后,由于技术的进步,太阳能电池的材料、结构、制造工艺等方面不断改进,降低了生产成本,开始在地面应用,光伏发电逐渐推广到很多领域。但是,由于价格问题,市场没有打开,太阳能电池产量的年增长率平均为 12% 左右^[22]。

1.3.2 光伏产业飞速发展

随着太阳能电池的种类不断增多,应用范围日益广阔,市场规模逐步扩大。至 1994 年,世界太阳能电池销售量已达 64MW,呈飞速发展之势。21 世纪以来,一些发达国家纷纷制定了发展包括太阳能电池在内的可再生能源计划。太阳能电池的研究和生产在欧洲、美洲、亚洲大规模铺开。美国和日本为争夺世界光伏市

场的霸主地位,争相出台太阳能技术的研究开发计划。日本在1994年出台了新阳光计划;欧盟在1997年出台了百万屋顶计划;德国在1999~2003年出台了十万屋顶计划;德国2004年出台了可再生能源法及新补贴计划;西班牙及意大利在2005年实施了类似德国的计划;中国在2006年实施了可再生能源法;美国加州在2006~2011年开展了30亿美元,100万家庭太阳能系统,3000MW·h发电量的计划。从1997年开始,全球太阳能电池的产量年增长率平均为40%以上。最近5年,更是达到了49.5%。2003年全世界生产总量更达到744MW。2007年全球太阳能电池产量达3436MW,较2006年增长了56%。2008年全球太阳能电池产量达6.4GW,增速近100%,其中中国2GW,欧洲1.6GW,日本1.2GW,美国700MW,其他国家和地区是850MW。发达国家正在把太阳能的开发利用作为能源革命的主要内容和长期规划,光伏产业正日益成为国际上继IT、微电子产业之后又一爆炸式发展的行业。

进入21世纪,全球各国政府通过颁布优惠政策与相关法律加速可再生能源的开发利用,这极大促进了光伏行业的发展。越来越多的国家开始实行“阳光计划”,开发太阳能能源。如美国的“光伏建筑计划”、欧洲的“百万屋顶光伏计划”、日本的“朝日计划”以及我国已开展的“光明工程”等^[23~25]。

目前,太阳能电池的应用领域非常广泛,已经遍及军事和航天领域,并且深入到与生活息息相关的行业,如农渔业、市政灯光等部门,尤其在一些偏远的山区和地形比较复杂的地区使用小型光伏发电组件可以节约架设线路的费用。目前晶体硅电池占据着绝大多数的市场份额,是光伏发电市场的主要产品。因为晶体硅太阳能电池技术日益成熟,生产成本逐年走低,光电转化效率较高,电池各组件寿命长。在将来很长一段时间内仍是太阳能电池发展的主流选择。然而,目前技术生产的晶体硅太阳能电池的光电转换效率还有较大的提升空间,提高太阳能电池的光电转换效率仍然是光伏企业提高收益的主要手段。提高转化效率可以通过采用优异的电池结构来实现。目前,很多光伏企业开发出新的电池结构以及优化生产工艺,如PERC结构电池、IBC结构电池、MWT结构电池、背接触电池等,这些电池的光电转换效率都较传统电池有非常大的提高,但是仍然有非常大的提升空间。表1-1给出了世界各国政府推出的光伏产业发展扶持相关政策^[26]。

德国、美国、日本三个国家是主要的利用太阳能的国家,集中了太阳能电池的主要生产商,也是产品主要的需求国。西班牙则发展迅速。德国太阳能装机容量在2007年达到1328MW,占世界新增容量的47%。德国是目前全球最大的太阳能发电市场,而西班牙是增长最快的市场之一,2007年新增太阳能光伏发电装机容量640MW,同比增长480%,成为全球新的第二大市场。美国市场新增220MW,同比增长57%,只有日本在政府取消了一定的政策补贴后增速下降了22%,综上,全球太阳能电池呈迅猛式的发展趋势^[26]。

表 1-1 各国政府推出的光伏扶持政策^[26]

国家	扶 持 政 策	预计市场容量
澳大利亚	2009 年 3 月 1 日启动第一阶段上网电价, 50.05 澳分/度, 相当于正常供电成本的 3.88 倍	2013 年太阳能发电装机容量达 400MW
法国	住宅用户回购电价 0.3 欧元, 商业系统 0.45 欧元, BIPV 补助 0.55 欧元/度	2028 年累计达 7GW
日本	补助 7 万日元/kW, 较 2006 年的 3 万 ~ 4 万日元提升 1 倍。安装成本为 60 日元/kW。2009 年 1Q 补贴 90 亿日元, 2009 年 4 月 ~ 2010 年 3 月补贴 200 亿日元。2020 年日本要使 70% 以上的新建住宅安装太阳能电池板	400 ~ 500MW
美国	奥巴马政府推出可再生能源计划, 2012 年占总发电量的 10%, 2025 年占 25%, 美国目前电力总装机容量为 10 亿千瓦; 将商用和家用太阳能装置减税 30% 的政策延长 8 年, 对于家用太阳能装置, 相当于减少了 2000 美元/kW 的投资; 洛杉矶, 2020 年新增 1280MW, 分三个阶段, 一阶段居民屋顶 380MW, 二阶段市政供电 500MW, 三阶段政府屋顶 400MW; 佛罗里达, 商用、家用太阳能剩余电力以高于该市标准电费 1 倍的价钱卖给电力公司, 20 年有效	可再生能源装机容量将达到 5 亿千瓦
希腊	投资大于 10 万欧元的工程, 可获得 40% 的补贴; 10 年购电价, 本岛 0.4 欧元/度, 各群岛 0.5 欧元/度	2009 年新增 750MW, 远期 3GW
韩国	不大于 3kW 的设备, 政府给予总安装费用 60% 的补贴; 每度电补贴 677.38 韩元	2012 年达 1300MW
印度	制定了 0.3 美元/度的上网电价政策	2009 年增至 50MW

1.4 中国太阳能发电现状与发展前景

1.4.1 中国太阳能资源非常丰富

中国太阳能资源非常丰富, 理论储量达每年 17000 亿吨标准煤。太阳能资源开发利用的潜力非常广阔。中国地处北半球, 南北距离和东西距离都在 5000km 以上。在中国广阔的土地上, 有着丰富的太阳能资源。大多数地区年平均日辐射量在每平方米 $4\text{kW} \cdot \text{h}$ 以上, 西藏日辐射量最高达每平方米 $7\text{kW} \cdot \text{h}$ 。年日照时间大于 2000h, 居世界第二位, 仅次于撒哈拉大沙漠。与同纬度的其他国家相比, 与美国相近, 比欧洲、日本优越得多, 因而有巨大的开发潜能。我国太阳能资源较丰富地区包括河北西北部、山西北部、内蒙古南部、宁夏南部、甘肃中部、青海东部、西藏东南部和新疆南部等地^[27]。

1.4.2 中国太阳能光伏产业发展

中国是目前世界最大的太阳能光伏产品生产国, 2007 年太阳能发电量达到