

太阳能电池发展现状与我国阳光发电规划*

魏 光 普

(上海大学材料科学系 上海 201800)

摘 要 介绍了我国及其他一些国家太阳能电池的发展情况,列举了单晶硅、多晶硅、非晶硅、砷化镓、磷化铟及铜铟硒等半导体材料制备的太阳能电池的结构、性能指标及产量价格等数据,也报道了我国太阳能电池的研制生产情况及近年生产、应用规划,此外还概述了太阳能电池的发展远景。

关键词 太阳能电池,阳光发电,半导体

WORLDWIDE DEVELOPMENT OF SOLAR CELLS AND THE NATIONAL PHOTOVOLTAIC PROJECT IN CHINA

Wei Guangpu

(Department of Materials Science, Shanghai University, Shanghai 201800)

Abstract The worldwide development of solar cells made from single crystal silicon, polycrystalline silicon, amorphous silicon, GaAs, InP and CuInSe₂ semiconductors are reviewed. The structures, characteristics and production of these solar cells are described. The development of solar cells and the National Photovoltaic Project in China are also reviewed.

Key words solar cell, photovoltaic, semiconductor

1 前言

太阳可以说是取之不尽、用之不竭的能源。太阳与地球的平均距离为1亿5千万公里。在地球大气圈外,太阳辐射的功率密度为 1.353 kW/m^2 (称为太阳常数),在地球表面正午垂直入射时,太阳辐射功率密度约为 1 kW/m^2 。从太阳到地球的总辐射功率若换算为电功率约为 $177 \times 10^{12}\text{ kW}$,比目前全世界的平均消费电力大 10^8 倍。

在人口不断增加,而煤与石油等矿物能源逐渐枯竭的今天,太阳能的应用显得愈来愈重要,成为全世界的研究热点。目前,太阳能的直接应用方法主要基于光热效应和光电效应。太阳灶、太阳能热水器等是将光能转变为热能的

应用。半导体太阳能电池可直接将光能转变为电能,应用起来十分方便,因而受到特别的重视。特别是近年来小型半导体逆变器(将直流电变为交流电的器件)的出现,使太阳能电池发电系统很易于和电网连接,应用就更加方便了。现在每年都有世界性的大型国际会议来研讨太阳能电池的发展问题,1996年10月还在津巴布韦首都哈拉雷召开了世界各国政府首脑会议,研究太阳能应用的开发和推广问题。现在,兆瓦级中大型太阳能电池发电站正在全世界建设和发展,十兆瓦级左右的太阳能电池发电站也已建成投产。

太阳能电池的应用主要分为空间应用和地面应用两大部分。空间应用是指人造卫星、航天航空飞船上应用的太阳能电池。地面应用主要用在

* 1999 - 01 - 25 收到初稿;1999 - 04 - 19 修回

微波中继站、铁路信号站、农用水泵、航标灯及各种中小型及户用太阳电池系统。

值得注意的是,太阳电池作为屋顶、外墙、窗户等建筑材料正在世界范围内逐步推广。美国、日本、印度尼西亚及斯里兰卡等一些国家正在推行庞大的太阳能屋顶计划,特别是美国提出了要在近 10 余年中实现百万户阳光发电屋顶计划^[1]。据计算,一个 3kW 的太阳电池屋顶发电系统发的电基本上可满足四口之家的需要。在白天,太阳电池发的电可通过逆变器输入电网。晚上或阴雨天发电不足时,则可从电网取电供作家庭应用,输出和输入的电量每月可基本平衡或有剩余。据计算,这种发电系统每度电的发电成本可降低到 0.08 美元以下,可与火力发电成本竞争。

2 太阳电池的发展现状

太阳电池的进展情况可以从其性能指标、产量、价格等方面来评价。太阳电池的性能指标有开路电压、短路电流、填充因子、光电转换效率等多项,其中最主要的指标是光电转换效率,即将光能转变为电能的效率。

太阳电池主要可以分为硅太阳电池和化合物半导体太阳电池两大类,下面分别加以叙述。

2.1 硅太阳电池

硅是地球上第二位最丰富的元素,而且无毒性,用它制作的太阳电池效率也很高,因此它是最适于制作太阳电池的半导体材料。1997 年,世界上太阳电池年产量约为 120 MW,其中 99% 以上为硅太阳电池。在硅太阳电池中又可分为单晶硅、多晶硅和非晶硅太阳电池三类。

2.1.1 单晶硅和多晶硅太阳电池

单晶硅和多晶硅太阳电池是对 p 型(或 n 型)硅基片经过磷(或硼)扩散做成 p/n 结而制得的。单晶硅太阳电池效率高、寿命长、性能优良,但成本高,而且限于单晶的尺寸,单片电池面积难以做得很大,目前比较大的为 $\phi 10-20\text{cm}$ 的圆片。多晶硅电池是用浇铸的多晶硅锭切片制作而成,成本比单晶硅电池低,单片电池

也可以做得比较大(例如 $30\text{cm} \times 30\text{cm}$ 的方片),但由于晶界复合等因素的存在,效率比单晶硅电池低。

现在,单晶硅和多晶硅电池的研究工作主要集中在以下几方面:

(1) 用埋层电极、表面钝化、密栅工艺、优化背电场及接触电极等来减少光生载流子的复合损失,提高载流子的收集效率,从而提高太阳电池的效率。澳大利亚新南威尔士大学格林实验室采用了这些方法,已经创造了目前硅太阳电池世界公认的 AM1.5 条件下 24% 的最高效率。图 1 为这种太阳电池的结构图^[2]。

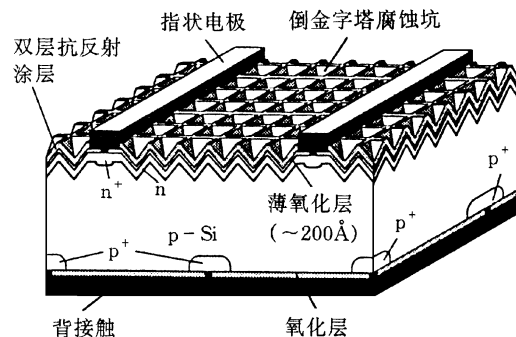


图 1 高效硅太阳电池的结构图

(2) 用优化抗反射膜、凹凸表面、高反射背电极等方式减少光的反射及透射损失,以提高太阳电池效率。

(3) 以定向凝固法生长的铸造多晶硅锭代替单晶硅,优化正背电极的银浆、铝浆的丝网印刷工艺,改进硅片的切磨、抛光工艺等,千方百计降低成本,提高太阳电池效率。目前最大硅锭重量已达 270 余公斤。

(4) 薄膜多晶硅电池还在大力研究和开发。计算表明,若能在金属、陶瓷、玻璃等基板上低成本地制备厚度为 $30-50\mu\text{m}$ 的大面积的优质多晶硅薄膜,则太阳电池制作工艺可进一步简化,成本可大幅度降低。因此多晶硅薄膜太阳电池正成为研究热点。

现在硅单晶及多晶太阳电池的世界年产量已达到 120 MW 左右。硅太阳电池的最高效率可达 18%—24%。航空航天用的高质量太阳电池在 AM0 条件下的效率约为 13.5%—18%,

而地面用的大量生产的太阳电池效率在 AM1 条件下大多在 11%—18% 左右。

2.1.2 非晶硅太阳电池

由于非晶硅对太阳光的吸收系数大,因而非晶硅太阳电池可以做得很薄,通常硅膜厚度仅为 1—2 μm ,是单晶硅或多晶硅电池厚度(0.5 mm 左右)的 1/500,所以制作非晶硅电池资源消耗少。

非晶硅太阳电池一般是用高频辉光放电等方法使硅烷(SiH_4)气体分解沉积而成的。由于分解沉积温度低(200 $^\circ\text{C}$ 左右),因此制作时能量消耗少,成本比较低,且这种方法适于大规模生产,单片电池面积可以做得很大(例如 0.5 m \times 1.0 m),整齐美观。非晶硅电池的另一特点是它可以做在玻璃、不锈钢板、陶瓷板、甚至柔性塑料片等基板上,还可以制成建筑屋顶用的瓦状太阳电池,应用前景广阔。非晶硅电池的又一特点是对蓝光响应好,在一般的荧光灯下也能工作,因此被广泛用作电子计算器和手掌玩具的电源,估计全世界使用量达到每月 1 千万片左右。以上这些优点,使非晶硅太阳电池在近 10 余年来得到大踏步的发展,1997 年全世界的产量估计已达到 30 MW 以上。

非晶硅由于其内部结构的不稳定性和大量氢原子的存在,具有光疲劳效应(Staebler-Wronski 效应),故非晶硅太阳电池经过长期光照后,效率会变低。特别是在强光光照下长期稳定性存在问题。近 10 年来经努力研究,虽有所改善,但尚未彻底解决问题,故作为电力电源,尚未大量推广。

非晶硅中由于原子排列缺少结晶硅中的规则性,缺陷多。因此单纯的非晶硅 p/n 结中,隧道电流往往占主导地位,使其呈电阻特性,而无整流特性,也就不能制作太阳电池。为得到好的二极管整流特性,一定要在 p 层与 n 层之间加入较厚的本征层 i,以扼制其隧道电流,所以非晶硅太阳电池一般具有 pin 结构。为了提高效率和改善稳定性,有时还制作成 pin/pin/pin 等多层结构式的叠层电池,或是插入一些过渡层。

非晶硅太阳电池的研究,现在主要着重于

改善非晶硅膜本身性质,以减少缺陷密度,精确设计电池结构和控制各层厚度,改善各层之间的界面状态,以求得高效率和高稳定性。

目前非晶硅单结电池的最高效率已可达到 14.6% 左右,大量生产的可达到 8%—10% 左右。叠层电池的最高效率可达到 21.0%。图 2 为在多晶硅基片上制作的四端子叠层电池的结构和特性图^[3]。

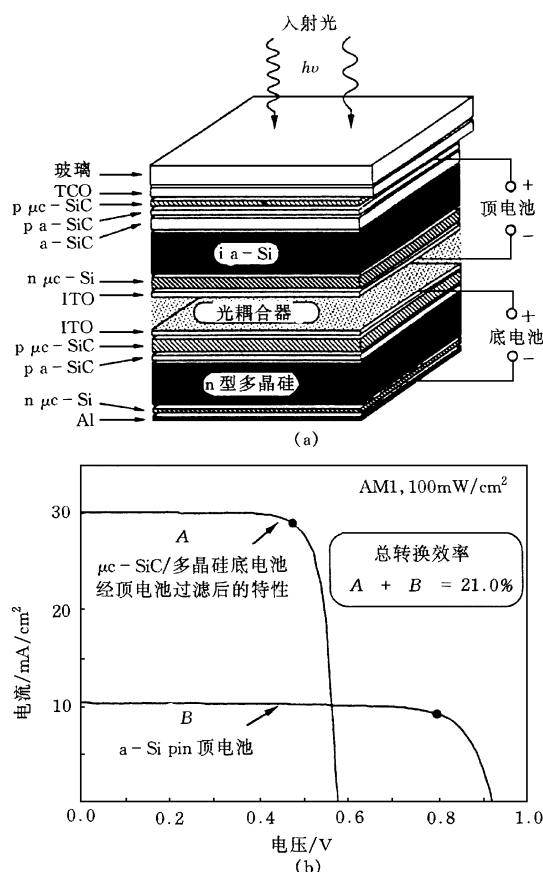


图 2 在多晶硅基片上制作的四端子叠层电池

(a) 叠层电池的结构; (b) 叠层电池的特性图

(图中 A 的参数为: $V_{oc} = 575 \text{ mV}$, $J_{sc} = 30.2 \text{ mA/cm}^2$, 曲线因子 = 79.2%, 转换效率 = 13.75%; B 的参数为: $V_{oc} = 917 \text{ mV}$, $J_{sc} = 10.4 \text{ mA/cm}^2$, 曲线因子 = 76.0%, 转换效率 = 7.25%)

2.2 化合物半导体太阳电池

在化合物半导体太阳电池中,目前研究应用较多的有 GaAs、InP、CuInSe₂ 和 CdTe 太阳电池。由于化合物半导体或多或少有毒性,容易造成环境污染,因此产量少,常常使用在一些特

殊的场合。

2.2.1 砷化镓太阳电池

砷化镓 (GaAs) 太阳电池可以得到较高的效率,实验室最高效率已达到 24% 以上,一般航天用的太阳电池效率也在 18%—19.5% 之间。砷化镓太阳电池目前大多用液相外延方法

或金属有机化学气相沉积 (MOCVD) 技术制备,因此成本高,产量受到限制,降低成本和提高生产效率已成为研究重点。砷化镓太阳电池目前主要用在航天器上。图 3 为效率达到 25.7% 的 GaInP₂-GaAs 双异质结电池的结构图及电压-电流特性曲线^[4]。

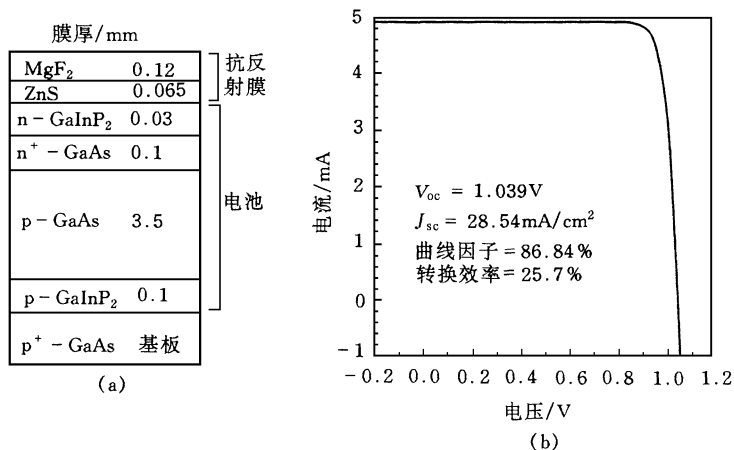


图 3 GaInP₂-GaAs 双异质结电池
(a) 结构; (b) 特性图

现在,硅单晶片制备技术成熟,成本低,因此以硅片为衬底,以 MOCVD 技术用异质外延方法制造 GaAs 太阳电池是降低 GaAs 太阳电池成本的很有希望的办法。目前,这种电池的效率也已达 20% 以上。但 GaAs 和 Si 晶体的晶格常数相差较大,在进行异质外延生长时,外延层晶格失配严重,难以获得优质外延层。为此常在 Si 衬底上首先生长一层晶格常数与 GaAs 相差较少的 Ge 晶体作为过渡层,然后再生长 GaAs 外延层,这种 Si/Ge/GaAs 结构的异质外延电池正在不断发展中。控制各层厚度,适当变化结构,可使太阳光中各种波长的光子能量都得到有效利用,目前以 GaAs 为基的多层结构太阳电池的效率已接近 40%。

2.2.2 磷化铟太阳电池

磷化铟 (InP) 太阳电池具有特别好的抗辐照性能,因此在航天应用方面受到重视,目前这种电池的效率也已达 17%—19%。

2.2.3 CuInSe₂ 多晶薄膜太阳电池

这种电池的效率也已达 17.6% 左右,而

且性能稳定,作为多晶薄膜电池是很有发展前途的。但因组分较复杂,制作工艺重复性差,影响了它的发展。

此外,CdS/CdTe 太阳电池的效率也已达 15.8%,但这种电池毒性大,易造成对环境的污染。

3 我国阳光发电规划

我国疆土辽阔,且大都位于北纬 20°至 45° 之间,因此日照充足,太阳能资源十分丰富。特别是西藏、青海、新疆等高原高寒地区,大气层相对稀薄,空气中水汽、烟尘含量少,透明度高,加之气候干燥少雨,日照量年平均达到 3000—3300h,太阳光能资源最为丰富。图 4 是我国日照资源的大致分布图,图中还画出了现在我国有太阳电池生产厂的 9 个城市的名称。

我国从 1958 年开始研制太阳电池,目前约有 38 个研究及生产单位,生产能力超过 5.5 MW/a,但因市场及原料问题的影响,实际

物理

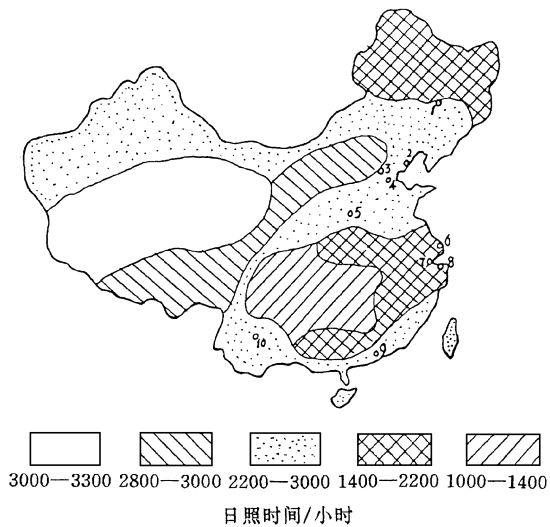


图4 我国日照资源和太阳能电池生产厂的城市名称图
1 哈尔滨; 2 秦皇岛; 3 北京; 4 天津; 5 开封;
6 上海; 7 杭州; 8 宁波; 9 深圳; 10 昆明

产量只有 $1.5 \sim 2 \text{ MW/a}$ 。硅太阳能电池组件成本约为每峰瓦 (W_p) 20 元, 市场价约 $40 \text{ 元}/W_p$, 非晶硅太阳能电池则更便宜一些。

自 1992 年联合国召开环境与发展大会后, 我国政府多次强调发展新能源和可再生能源对经济持续发展和环境保护的重要作用。1995 年初, 国家计委、国家科委和国家经贸委共同制定了“中国新能源和可再生能源发展纲要”, 并选定了“中国新能源和可再生能源发展优先项目”。在此基础上, 国家科委工业司还制定了我国第九个五年计划期间“太阳能光利用技术”科技攻关计划, 明确要加速发展我国太阳能电池的生产技术(特别是多晶硅太阳能电池生产技术), 进一步降低成本, 开拓应用途径, 大力推广应用^[7]。

根据我国原电力工业部 1995 年底的统计, 我国尚有 29783 个行政村、1730 万农牧户(约 8000 万农牧民)没有用电。这些农牧户大多分布在内蒙古、青海、新疆、西藏等边陲地区, 电网很难到达(或要花巨大投资)。为解决这些地区农牧民的照明、看电视、电冰箱等家庭用电问题, 采用中小型光伏电站是一个极好的途径, 因为它投资较少, 且搬动方便, 使用便利。此外, 在

电网尚未到达的铁路站点、微波中继站及航标灯等地点, 也正在逐步推广光伏特种电源。为此, 原电力工业部(现电力工业总公司)新能源司制订了近年的阳光发电规划, 见表 1。

表 1 近年的阳光发电规划

光伏系统类型	生产量/ MW	
	1994—2000	2001—2020
户用光伏系统 (50 W)	15 (50 W × 60000/年)	60 (50 W × 60000/年)
小型光伏系统 (10k W—30k W)	3.5 (10k W × 50/年)	30 (30k W × 50/年)
特种光伏系统	11.5 (1.7 MW/年)	40 (2 MW/年)
联网光伏电站	1 (500k W × 2)	5 (1000k W × 5)
太阳热发电站	35 MW	100 MW

此外, 我国政府有关部门也正与世界银行及联合国其他有关组织合作, 利用全球环境基金, 在我国实行光伏电源推动计划。拟于近 4 年内在我国新疆、青海、甘肃、内蒙等地区推广总容量为 10 MW(30—50 万套)的户用光伏电源。目前这些计划正在实施中。

4 结束语

在这新世纪即将来临之际, 展望太阳能电池和阳光发电事业的开发研究, 可以肯定, 在 21 世纪, 太阳能电池和阳光发电技术将会有极大的发展。预期成本低、效率高的多晶硅和非晶硅薄膜电池将会占领太阳能电池的主导地位。附有阳光发电系统的住宅将会在全世界普及起来。科学家们还在计划建造空间太阳能电站。由于地面上几百公里高度处太阳辐射强烈且持续稳定, 又不受气候及环境变化的影响, 因此若在空间建造阳光发电站, 将发出的电能采用微波或激光等无线电能传输技术送到地面以供应用, 那是非常理想的。现在, 美、日、俄、法等国都在对此作可行性研究, 预计到 21 世纪 20 年代有望建立初步的空间阳光电站。另外, 还有些工程技术专家建议在地球上各个洲的广大地区建立大型阳光电站, 然后用超导电缆连接成环球电网, 于是这个电网的供电就可以不受昼夜变化

的影响,这就是所谓 GENESIS(global energy network equipped with solar cells and international super-conductor grids)计划.图5为这种全球性太阳能发电厂超导联网系统设想图.

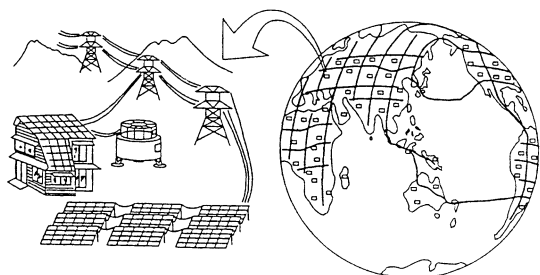


图5 全球性太阳能发电厂超导联网系统设想图

参 考 文 献

[1] Rannels J. Implementation and Financing for President Clinton's Million Solar Roofs Initiative. In: the Conference

Abstract of Second World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion. Vienna, Austria, 1998. 2

- [2] Zhao J H, Wang A H, Green M A. In: Conference Record of the 24th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. Hawaii, USA, 1994. 1477
- [3] Ma W *et al.* In: Proc. of the 23rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference. Louisville, USA, 1993. 338
- [4] Kurtz S R, Olson J M, Kibbler A E. In: Proc. of the 21st IEEE Photovoltaic Specialists Conference. Orlando, USA, 1990. 138
- [5] Zhang Y, Wei G P, Yang J H. National Photovoltaic Project in China. In: Proc of the High-Level Expert Meeting on Solar Energy in East and South-East Asia. Akita, Japan, 1996. 129
- [6] 李国欣,徐传继.太阳能学报,1998,19:444
- [7] 陈哲良.太阳能,1997(2):6

(上接第671页)

的量子阱效应机制,对人们进一步深入了解电子的运动本质和磁性有指导意义.还预示着在不久的将来,人们可以通过改变电子的波函数的形态来制备电子微器件,实现“波函数工程”的美好梦想.

参 考 文 献

[1] Grünberg P, Schreiber R, Peng Y *et al.* Phys. Rev.

Lett., 1986, 57:2442—2445

- [2] Baibich M N, Broto J M, Fert A *et al.* Phys. Rev. Lett., 1988, 61:2472—2475
- [3] Parkin S S P, More N, Roche K P. Phys. Rev. Lett., 1990, 64:2304—2307
- [4] Kawakami R K, Rotenberg E, Choi H J *et al.* Nature, 1999, 398:132—134

(上接第701页)

了.通常,在两三个分子振动周期之内,波包的发散尚不明显.这要求延迟时间小于 10^{-13} s.脉冲宽度应比延迟时间更短.因此,所用的激光脉冲应属于飞秒范围.虽然目前还没有用这种方法成功控制反应通道的直接实验报道,但相应的光谱研究表明,上述关于波包运动的分析是真实的.

最后谈一件事.当今对化学反应的认识已由总包反应(什么样的反应物最后生成哪些产

物).基元反应(什么反应物直接生成什么产物)深入到了态-态反应的层次.态-态反应研究什么量子态的什么反应物,经过反应散射生成什么量子态的什么产物,即从量子动力学的角度对化学反应进行考察.在态-态反应的研究中,激光扮演着极为重要的角色,因为激光除了用来进行态的探测之外,还要用来进行态的制备.