

薄膜太阳能电池的研究进展*

耿新华 孙云 王宗畔 李长健

(南开大学光电子研究所,天津 300071)

摘要 介绍了薄膜太阳能电池在光伏技术中的位置,详细叙述了非晶硅、铜铟锡、碲化镉等主要薄膜太阳能电池的基本结构、制造方法、研究进展和现状,指出了存在的关键问题和解决的途径,并介绍了薄膜太阳能电池的发展趋势和应用前景。

关键词 薄膜太阳能电池

THIN FILM SOLAR CELLS

Geng Xinhua Sun Yun Wang Zongpan Li Changjian

(Institute of Photoelectronics of Nankai University, Tianjin 300071)

Abstract We review the importance of thin film solar cells in photovoltaic technology, and describe the general structure, manufacture, progress and status of major thin film solar cells such as a-Si, CuInSe₂, CdTe and so on. We also point out the key problem and ways to solve them. The development prospects are over viewed.

Key words thin film solar cell

1 前言

随着能源危机及传统能源对环境污染的日趋严重,开发可再生清洁能源成为国际范围内的重大战略问题之一。太阳能是取之不尽、用之不竭的清洁能源,全球年能量消耗的总和只相当于太阳 40 分钟内投射到地球表面的能量,因此,研究与开发太阳能利用成为世界各国政府可持续发展能源的战略决策。阳光发电是大规模经济地利用太阳能的重要手段,因此对各种太阳能电池的研究受到普遍重视,美国、欧洲、日本及发展中国家均制定了庞大的光伏技术的发展计划,把光伏发电作为人类未来能源的希望。

目前,光伏发电在航天、通讯及低功耗电子产品领域中已成功地占据了不可替代的位置,

但作为社会整体能源结构的组成部分所占比例尚不足 1%,造成这种状况的主要原因是太阳能电池的成本较高。要使光伏发电真正成为能源体系的组成部分,必须要大幅度地降低成本。薄膜太阳能电池在降低成本方面比晶体太阳能电池具有更大的优势,一是实现薄膜化后,可极大地节省昂贵的半导体材料;二是薄膜电池的材料制备和电池同时形成,因此节省了许多工序;三是薄膜太阳能电池采用低温工艺技术,不仅有利于节能降耗,而且便于采用廉价衬底(玻璃、不锈钢等)。为此,自 70 年代以来,世界各国纷纷投入巨资,制定规划,组织队伍,掀起对薄膜太阳能电池的研究热潮,二十几年来在研究水平和开

* 国家攻关项目

1998 - 08 - 14 收到初稿,1998 - 09 - 14 修回

发应用方面均取得了长足的进步。我国在薄膜太阳电池研究方面也有很大发展。

目前研究比较深入,而且占据主导地位的薄膜太阳电池主要有硅基薄膜太阳电池和铜铟锡、碲化镉等化合物半导体薄膜太阳电池。

2 薄膜太阳电池研究进展

2.1 硅基薄膜太阳电池

2.1.1 非晶硅基太阳电池

非晶硅(a-Si)太阳电池是在玻璃(glass)衬底上沉积透明导电膜(TCO),然后依次用等离子体反应沉积p型、i型、n型三层a-Si,接着再蒸镀金属电极铝(Al)。光从玻璃面入射,电池电流从透明导电膜和铝引出,其结构可表示为glass/TCO/pin/Al,还可以用不锈钢片、塑料等作衬底。

硅材料是目前太阳电池的主导材料,在成品太阳电池成本份额中,硅材料占了将近40%,而非晶硅太阳电池的厚度不到 $1\mu\text{m}$,不足晶体硅太阳电池厚度的 $1/100$,这就大大降低了制造成本,又由于非晶硅太阳电池的制造温度很低($\sim 200^\circ\text{C}$)、易于实现大面积等优点,使其在薄膜太阳电池中占据首要地位,因此也是投资最大、研究最广泛、目前技术最成熟的薄膜电池。自从1976年美国RCA实验室制成世界上第一个非晶硅太阳电池以来,围绕提高电池性能,人们开展了许多制造方法、材料和器件结构方面的研究。在制造方法方面有电子回旋共振法、光化学气相沉积法、直流辉光放电法、射频辉光放电法、溅射法和热丝法等。特别是射频辉光放电法由于其低温过程($\sim 200^\circ\text{C}$),易于实现大面积和大批量连续生产,现成为国际公认的成熟技术。在材料研究方面,先后研究了a-SiC窗口层、梯度界面层、 $\mu\text{C-SiC}$ p层等,明显改善电池的短波光谱响应。这是由于a-Si太阳电池光生载流子的生成主要在i层,入射光到达i层之前部分被p层吸收,对发电是无效的。而a-SiC和 $\mu\text{C-SiC}$ 材料比p型a-Si具有更宽的光学带隙,因此减少了对光的吸收,

使到达i层的光增加;加之梯度界面层的采用,改善了a-SiC/a-Si异质结界面光电子的输运特性。在增加长波响应方面,采用了绒面TCO膜、绒面多层背反射电极(ZnO/Ag/Al)和多带隙叠层结构,即glass/TCO/ $p_1i_1n_1/p_2i_2n_2/p_3i_3n_3$ /ZnO/Ag/Al结构。绒面TCO膜和多层背反射电极减少了光的反射和透射损失,并增加了光在i层的传播路程,从而增加了光在i层的吸收。多带隙结构中,i层的带隙宽度从光入射方向开始依次减小,以便分段吸收太阳光,达到拓宽光谱响应、提高转换效率之目的。在提高叠层电池效率方面还采用了渐变带隙设计、隧道结中的微晶化掺杂层等,以改善载流子收集。

为了适应实际应用中高输出电压的需要,又发展了集成型a-Si太阳电池子组件,其中多个子电池可通过蒸发法实现内部联接在一个绝缘衬底上而不需要任何导线。激光切割技术的使用使有效面积达到90%以上。所有这些新技术的采用使小面积a-Si太阳电池的转换效率从5%提高到14.6%^[1],大面积太阳电池子组件的效率超过10%^[2]。

中国自70年代开始研究a-Si太阳电池,小面积电池效率达到11.2%, $10\times 10\text{cm}^2$ 电池的效率达到8.55%, $20\times 20\text{cm}^2$ a-Si/a-Si叠层电池效率达到8.3%。

在薄膜太阳电池中,非晶硅电池率先实现了商品化,自1980年日本三洋电气公司利用a-Si太阳电池制成袖珍计算器后,1981年便实现了工业化生产,并打入世界市场。80年代后期,a-Si电池的年销售量已占到世界光伏销量的 $1/3$,而且在以后的几年中,产量连续增长,电池成本也逐年下降。随着非晶硅电池性能的不不断提高,成本不断下降,其应用领域亦在不断扩大。由计算器扩展到各种消费产品及其他领域,如太阳能收音机、路灯、微波中继站、交通道口信号灯、气象监测以及光伏水泵、户用独立电源等。光伏发电除用于边远无电地域外,还实现了与电网并网发电。

然而,近几年非晶硅太阳电池年销售量增加的速度并不是很快,功率型应用也大多在示

范阶段.在功率型应用中的主要问题是非晶硅太阳能电池效率的不稳定性.由于a-Si:H材料本身存在着SW效应,即在光照条件下,a-Si:H材料的光电性能随光照时间增加而下降,从而使非晶硅太阳能电池的转换效率呈现光致衰退效应.为了有利于非晶硅太阳能电池的推广应用,自90年代起,国际上提出要提高非晶硅电池的的稳定效率.为此,美国成立了由研究机构和大公司组成的专门研究队伍,其他各国也均围绕提高稳定效率问题开展工作.电池效率的光致衰退主要是由i层的SW效应引起的,因此,为了阻止SW效应,一方面要减少非晶硅材料中的Si-H₂键和O,N等杂质污染以及采用大氢稀释方法制备i层.另一方面是采用多带隙叠层结构,如a-Si/a-SiGe,a-Si/a-SiGe/a-SiGe等.由于叠层电池中各子电池的i层较薄,内建电场较强,从而减少了光生载流子的复合,抑制了电池特性的光致衰退.叠层结构的采用明显提高了电池的的稳定效率,如表1所示.

表1 a-Si太阳能电池和组件的最高稳定效率^[1,2]

结构	面积/cm ²	稳定效率/%	来源
a-Si	0.25	9.2	USSC
a-Si/a-Si	0.25	10.1	USSC
a-Si/a-SiGe	0.25	11.2	USSC
a-Si/a-SiGe/a-SiGe	0.25	13.0	USSC
a-Si/a-Si	1200	8.9	Fuji
a-Si/a-SiGe	902	9.5	USSC
a-Si/a-Si/a-SiGe	863	8.8	Solarex
a-Si/a-SiGe/a-SiGe	903	10.2	USSC

非晶硅太阳能电池稳定效率的提高也促进了其生产规模的进一步扩大,如美国的USSC,Canon和Solarex三大公司分别建立的5MW和两个10MW生产线于1997年正式投产^[3],这将推动a-Si太阳能电池更大规模的应用.

2.1.2 微晶、多晶硅薄膜太阳能电池

为了获得具有高效率、高稳定性的硅基薄膜太阳能电池,近年来又出现了微晶、多晶硅薄膜电池.微晶硅薄膜是采用大氢稀释和微量掺硼技术制备的,现已获得了效率为7.7%而且没有光致衰退效应的微晶硅太阳能电池^[4].多晶硅

薄膜的制造技术主要有两种,一种是采用PECVD技术或热丝法直接生长;另一种则是通过对a-Si:H材料进行后退火,实现低温固相晶化.日本CR实验室用PECVD技术在550生长的薄膜多晶硅太阳能电池的效率已达到9.8%^[5].三洋电器公司用a-Si:H材料经600退火的薄膜多晶硅制成了效率为9.2%的电池^[6],而且均没有光致衰退效应.目前,微晶硅电池中的关键问题是微晶硅材料本身的光电性能较差和沉积速率太低.而低温晶化多晶硅技术中的关键问题是如何进一步降低晶化温度,以便实现廉价衬底的薄膜多晶硅电池.近年出现的金属诱导晶化技术可把晶化温度降低到500以下^[7].这种技术是在非晶硅膜上按某种设计溅射某种金属,然后进行热退火.用以诱导晶化的金属分两类,一类与Si形成共晶体,如Au,In,Al,Sb等.另一类与Si形成硅化物,如Pd,Ti,Ni等.但这种技术在光伏器件中的应用尚有一些问题有待解决,其中主要问题是诱导金属污染将使材料的光敏性变差,以及晶粒间界残存金属带来的问题.另外,降低晶化温度的技术还有微波诱导、激光诱导技术等,但均未见关于电池应用方面的报道.

尽管在微晶、多晶硅薄膜技术中还存在许多问题,但是其在未来的高效率、低成本、长寿命薄膜光伏技术中具有很大的潜力,因为其不仅具有晶体硅材料的性能,而且具有非晶硅的低温技术、易于实现大面积等优点,因此也是目前国际上正掀起的前沿研究热点.特别是用微晶、多晶硅薄膜作为窄带隙材料与非晶硅组成叠层电池结构,可更充分地利用太阳光谱.目前,a-Si/ μ C-Si叠层太阳能电池效率已达到12%^[4],而a-Si/poly-Si叠层太阳能电池效率为11.5%^[5].理论计算表明,这种结构电池转换效率可达28%以上^[8].大面积优质低温多晶(微晶)硅薄膜的获得及与非晶硅电池的最佳匹配,将使硅基薄膜太阳能电池性能产生突破性进展.

2.2 铜铟硒薄膜太阳能电池

铜铟硒(CuInSe₂,简称CIS)薄膜太阳能电池

是多元化合物半导体中最有代表性的光伏器件。由于它具有高的转换效率、低的制造成本以及性能稳定而成为国际光伏界研究热点之一,很有可能成为下一代的商品化薄膜太阳电池。

CIS 太阳电池是在玻璃或其他廉价衬底上分别沉积多层薄膜而构成的光伏器件,其结构为:光 金属栅状电极/减反射膜/窗口层(ZnO)/过渡层(CdS)/光吸收层(CIS)/金属背电极(Mo)/衬底。经多年研究,CIS 太阳电池发展了不同结构,主要差别在于窗口材料的选择。最早是用 CdS 作窗口,其禁带宽度为 2.42eV,通过掺入适量的 ZnS,成为 CdZnS 材料,带隙有所增加。鉴于 CdS 对人体有害,大量使用会污染环境,而且材料本身带隙偏窄,近年来窗口层改用 ZnO,带宽可达到 3.3eV,CdS 只作为过渡层,其厚度大约几十纳米。为了增加光的入射率,在电池表面做一层减反膜 MgF₂,有益于电池效率的提高。

CIS 薄膜太阳电池具有以下特点而被人们称为最有希望的光伏器件。(1)吸收层薄膜 CuInSe₂ 是一种直接带隙材料,光吸收率高达 10⁵ 量级,最适于太阳电池薄膜化,电池厚度可以做到 2—3μm,降低了昂贵的材料消耗。(2) CIS 薄膜的禁带宽度为 1.04eV,通过掺入适量的 Ga 以替代部分 In,成为 CuIn_{1-x}Ga_xSe₂(简称 CIGS) 混溶晶体,薄膜的禁带宽度可在 1.04—1.7eV 范围内调整,这就为太阳电池最佳带隙的优化提供了新的途径。所以,CIS (CIGS)是高效薄膜太阳电池的最有前途的光伏材料。(3)抗辐射能力强,用作空间电源具有很强的竞争力。(4)制造成本低,年产 1.5MW,其成本是晶体硅太阳电池的 1/2—1/3,能量偿还时间在一年之内,远远低于晶体硅太阳电池^[9]。(5)电池性能稳定。美国波音航空公司曾经制备 91cm² 的 CIS 组件,转换效率为 6.5%,100mW/cm² 光照 7900h 后发现电池效率没有任何衰减。西门子公司制备的 CIS 电池组件在美国国家可再生能源实验室(NREL)室外测试设备上,经受 7 年的考验仍然显示着原有的性能^[10]。(6)转换效率高。1996 年,NREL 研制的

CIGS 太阳电池转换效率为 17.7% (0.4cm² 面积),是薄膜太阳电池的世界纪录。

为制作低成本、大面积 CIS 太阳电池,各国学者提出了不同的制作方法,除了吸收层 CIS 以外,其他各层通常采用真空蒸发或溅射成膜。过渡层 CdS 的制备使用化学成膜法可以保证膜的致密、均匀,易于控制。吸收层 CIS (CIGS) 是多元化合物,原子的晶格配比及结晶状况对其性能起着决定性的作用。制备方法大体分为两类,一类是以 Cu, In 和 Se 作源进行反应蒸发,称为共蒸法;另一类是先在基底上生长 Cu, In 层,在 Se 气氛中进行 Se 化,最终形成满足配比要求的 CuInSe₂ 多晶薄膜,称为硒化法。硒化法中,Cu 和 In 的厚度按配比严格控制,成膜方法有溅射、蒸发和电沉积等等。硒化过程使用的原料有 H₂Se + Ar (或 H₂) 气体和 Se + H₂ 固气混合体两种。H₂Se 气体剧毒,近年来以固态硒作源的硒化被广泛采用。另外还有其他方法,都是在这两类基础上发展起来的,电池效率做得最高的方法是 Cu + Se 和 In + Se 分别共蒸后再硒化。以上各种方法都各有所长,但是否适用于产业化还在继续探索中。

自 1976 年美国 Maine 州大学首次报道 CIS 薄膜太阳电池后,随着转换效率指标不断创新,逐渐引起光伏界的关注,很多发达国家都相继投入大量经费和研究力量,所取得的进展令人瞩目(见表 2)。基于 CIS 电池在所有薄膜光伏器件中的展现,足以证明 CIS 电池发展潜力是令人鼓舞的。

表 2 CIS 太阳电池参数表^[11]

	研究机构	面积/cm ²	开路电压/V	转换效率 / %
小面积单晶体电池	NREL	0.414	0.674	17.7
	Uppsala	0.38	0.647	17.6
	Univ/ RE Matsushita	0.48	0.655	17.6
	IEC	0.4	0.729	14.3
电池组件	SSI	3830		11.2
	EPV	3100	30.95	7.7
	Showa Shell	50.2	6.7	14.1
	IPE	90.6	9.3	13.9

CIS 太阳能电池性能如此优异,吸引世界众多的光伏专家研究了 20 年,但至今仍然没有产业化,其主要原因在于工艺的重复性差,高效电池成品率低。CIS(CIGS)薄膜是多元化合物半导体,原子配比及晶格匹配往往依赖于制作过程中对主要半导体工艺参数的精密控制。目前,在 CIS 电池制备过程中,缺乏控制膜生长的分析仪器,这是因为 CIS 薄膜的基本特性及晶化状况还没有完全弄清楚,无法预测出 CIS 材料性能和器件性能。CIS 膜与 Mo 衬底间较差的附着性也是成品率低的重要因素。以上这些问题是世界各国研究 CIS 电池的焦点所在。我国 CIS 电池研究水平落后于欧美国家,1cm² 面积电池转换效率为 8.57%,面临的技术难题与国外相同。目前,欧美国家的目标是尽快将 CIS 太阳能电池推向产业化,一些资深的研究部门通过调整自己的研究方向,解决了许多阻碍 CIS 电池进一步发展的困难。美国由 12 家大学和研究所及西门子公司的一个课题组联合制定了名为 FORSOL 研究计划,历时 4 年,意图是对 CIS 材料的特性进行仔细研究,并优化吸收层和窗口层的制备工艺,探索出一条健全、具有重复性且适于产业化的 CIS 太阳能电池组件的制备工艺,预计在 0.1m² 大衬底上制备出 10%—12% 的转换效率。该计划很大一部分集中在 CIS 晶体的生长和半导体分析。FORSOL 计划中第二个主要内容是围绕 CIS 吸收层和 ZnO 窗口层的相互作用问题,通常由 CdS 作为缓冲层,而缓冲层的作用至今还没有被很好地解释。发展不用重金属(如 Cd 元素)的窗口层技术是 FORSOL 计划的第三个集中点。还有一些研究机构进行小规模生产性试验,德国太阳能和氢研究中心与 Stuttgart 大学的联合小组建立了一条试验线^[10],通过蒸发可将 CIGS 连续沉积在大面积组件上的生产系统,在 7×7cm² 和 10×10cm² 基片上均匀沉积 CIGS 薄膜,电池效率达到 15%。采用连续移动衬底系统,在 30×30cm² 面积上沉积 CIGS,首次制作的组件中最大的转换效率为 11%。美国 EPV 公司也正在

建立 200kW CIS 太阳能电池中试线,为工业化生产探求一条切实可行的技术路线。

近年来,许多企业认识到 CIS 电池在未来能源市场中的市场前景和所处的地位,并已经着手组建 CIS 太阳能电池制造厂。美国 GSE(Global Solar Energy)公司拟在亚利桑那州的图森市建造一座年产 CIS 电池组件 1.5MW 的工厂^[9]。美国 GP(Golden Photon)公司在科罗拉多州要建立年产 2MW 的 CIS 太阳能电池生产线^[9],计划在巴西北部设置 500 所 CIS 太阳能电池充电站。工业界的投入必将促进 CIS 薄膜太阳能电池更快的发展,商品化的实现不会太遥远。

2.3 碲化镉薄膜太阳能电池

碲化镉(CdTe)是具有闪锌矿结构 - 族化合物半导体材料,有很高的光吸收系数,1μm 厚的 CdTe 可以使阳光中大于禁带宽度的辐射能吸收 99% 以上,很适合制作薄膜太阳能电池。以 CdTe 作为吸收体的薄膜半导体材料与窗口层 CdS 形成 n - CdS/p - CdTe 异质结太阳能电池,其结构为:光 减反射膜(MgF₂)/玻璃衬底/透明电极(SnO₂ F)/窗口层(CdS)/吸收层(CdTe)/欧姆接触过渡层/金属背电极。吸收层 CdTe 薄膜室温禁带宽度为 1.45eV,其中 Cd 空位为受主态,而 Te 空位为施主态,迁移率分别为 $\mu_e = 1050\text{cm}^2/\text{s} \cdot \text{V}$, $\mu_h = 80\text{cm}^2/\text{s} \cdot \text{V}$ 。它的制备方法有升华、MOCVD、CVD、电沉积、丝网印刷、真空蒸发以及原子层外延等多种方法。各种方法都曾做过转换效率 10% 以上的 CdTe 薄膜太阳能电池。美国南佛罗里达大学于 1993 年用升华法在 1cm² 面积上做出效率为 15.8% 的太阳能电池^[12],成为该种电池的最高纪录。

近年来,太阳能电池的研究方向是高转换效率、低成本和高稳定性。因此,以 CdTe, CuInSe₂ 和多晶硅膜为代表的薄膜太阳能电池倍受关注。人们认为, CdTe 薄膜太阳能电池是上述 3 种电池中最容易制造的,因而它向商品化进展最快。提高效率就是要对电池结构及各层材料工艺进行优化,适当减薄窗口层 CdS 的厚度,可减少入射光的损失,从而增加电池短波响应以提高短路电流密度,15.8% 的 CdTe 电池就采用了较

物理

薄的 CdS 窗口层而创了最高纪录. 有人用 CdZnS 或 ZnSe 作窗口, 同样制备出较好的电池. 吸收层 CdTe 与背电极金属的界面状态对电池特性的影响起着重要的作用. 对 CdTe 表面进行处理, 在与金属电极间增加一个过渡层 $P^+ ZnTe$ 或 $P^+ HgTe$, 改善了欧姆接触, 是提高电池效率的必要措施; 要降低成本, 就必须将 CdTe 的沉积温度降到 550 以下, 以适于廉价的玻璃作衬底; 实验室成果走向产业, 必须经过组件以及生产模式的设计、研究和优化过程. 近年来, 不仅有许多国家的研究小组已经能够在低衬底温度下制造出转换效率 12% 以上的 CdTe 太阳能电池, 而且在大面积组件方面取得了可喜的进展 (见表 3), 许多公司正在进行 CdTe 薄膜太阳能电池的中试和生产厂的建设, 有的已经投产.

表 3 CdTe 薄膜太阳能电池参数表^[10]

小面积单体电池			
研究机构	面积/cm ²	开路电压/V	转换效率 / %
USF	0.928	0.845	14.68
SCI	0.27	0.839	13.3
CSM	0.10	0.778	12.9
NREL	0.69	0.823	12.8
大面积组件			
研究机构	面积/cm ²	转换效率 / %	功率/W
SCI	6728	9.1	61
BP Solar	4540	8.4	38.2
Gp Matsushi-	3528	7.7	27.2
ta	1200	8.7	10

目前, CdTe 薄膜太阳能电池的深化研究和产业化都在积极进行, 欲达到真正的商品化, 尚有若干问题有待于进一步解决. 首先是制备 CdTe 薄膜工艺的优化. CdTe 的成膜方法有六七种之多, 其中许多方法已做出转换效率大于 12% 的太阳能电池. 可是, 不同工艺和同一工艺但不同人员所做的电池效率差别很大, 而且组件的效率又远远低于单体电池效率. 这表明, 按工业化的要求来看, 各种成膜方法均不成熟, 人们必须进行综合对比, 找出适于工业化的工艺方案. 其次是组件的稳定性也存在着问题. 近几年发现, 不同的研究者制备出的电池其稳定性差别很大, 美国 SCI 公司制作的电池经 NREL 室外两年

观测性能良好. 有的经过一段时间老化, 表现出明显的衰退迹象. 目前尚不能说明造成衰退的原因是 CdTe 材料本身的质量问题, 还是掺杂元素在界面上相互扩散的原因, 或者是由于人们还没有认识到的其他问题. 总之, CdTe 太阳能电池稳定性机理尚不十分清楚, 但可以肯定与电池材料和制作工艺密切相关, 这将成为商品化的最大隐患. 最后一个很重要的问题是, Cd 对环境的污染和对操作人员的健康危害如何防范, 这是一个很难解决的环保问题. 人们不能容忍在获取清洁能源的同时, 又对人体和人类生存空间造成新的危害. 最好的方案自然是经过研究找出解决 Cd 污染的有效办法, 否则只能靠人们权衡从电池上得到的效益与它造成的危害之间的轻重来选择.

CdTe 也是很有希望的低成本太阳能电池. 目前各国均在大力研究, 相信上述问题不久将会逐个解决, 使之成为下个世纪新的能源成分之一.

3 结束语

薄膜太阳能电池在未来光伏技术发展中占有重要的位置, 因为它为低成本电池制造提供了希望. 近年来, 其效率的连续提高, 增加了薄膜电池与晶体电池竞争的能力. 当然, 要使薄膜太阳能电池真正成为一种新能源在国民经济主战场中发挥重要作用, 还需要进一步提高效率, 并解决大规模生产中的关键技术问题. 我们相信, 随着材料、工艺、电池设计的同步发展, 电池性能的提高, 生产规模扩大和成本的进一步降低, 将会迎来薄膜太阳能电池的一个新时代.

参 考 文 献

- [1] J. Yang et al., 26th Photovoltaic Specialists Conference, (1997), 563.
- [2] S. Guha, 25th Photovoltaic Specialists Conference, (1996), 1017.
- [3] S. Guha et al., 14th Europe Photovoltaic Solar Energy Conference, (1997), 2679.
- [4] A. Shah et al., 26th Photovoltaic Specialists Conference, (1997), 569.
- [5] K. Yamamoto, 26th Photovoltaic Specialists Conference, (1997), 575.

- [6] M. Tanaka ,S. Tsuge ,S. Kiyama et al. ,SA YO Y Research Report , (1996 - 1997) , - 118.
- [7] J. H. Kim , J. Y. Lee. , *J. Appl. Phys.* , **35** (1996) , 2052.
- [8] H. Takakura et al. , International Solar Energy Society 1997 Solar World Conference ,(1997) ,11.
- [9] 赵允平 ,电源信息报 ,第 7 期(1997) ,7.
- [10] K. Zweibel et al. , 25th Photovoltaic Specialists Conference , (1996) ,745.
- [11] R. W. Birkmire , 26th Photovoltaic Specialists Conference , (1997) , 295.
- [12] C. Ferekides et al. , Conf. Record 23th Photovoltaic Specialists Conference , (1993) , 389.

浅谈物理学在核武器发展中的作用 *

郑绍唐

(北京应用物理与计算数学研究所 ,北京 100088)

摘 要 本世纪 30—40 年代 ,核物理的重大发现和发展开辟了人类利用核能的新纪元 .核物理学的新发现首先被用于军事目的 .中国在发展核武器的早期集中了一批杰出的物理学家 ,他们与力学家、数学家和工程技术人员一起 ,以他们的忠诚、智慧和勤奋创造了辉煌的业绩 .

关键词 物理学 ,核武器发展史

SOME OBSERVATIONS ON THE ROLE OF PHYSICS IN NUCLEAR WEAPON DEVELOPMENT

Zheng Shaotang

(*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088*)

Abstract The important discoveries and developments of nuclear physics during the 1930 's—1940 's opened a new era in the use of nuclear energy. The new discoveries were first applied to military purposes. In her early days of developing nuclear weapons China assembled a number of distinguished physicists who worked together with mechanicians , mathematicians and engineers. With their loyalty , intelligence and diligence , they accomplished great achievements.

Key words physics , the history of nuclear weapon

核武器的出现和发展无疑是 20 世纪人类生活中的一件大事 .它已影响到政治、经济、军事和外交等多个方面 .

1 本世纪 30—40 年代核物理的重大发现和发展开辟了人类利用核能的新纪元

本世纪 30 年代 ,世界上科学最发达的国家是西欧的英、法、德三国 .1932 年 2 月 27 日 ,英国剑桥大学卡文迪什实验室的查德威克 (James Chadwick) 发现了中子 .1932 年 ,德国的海森伯

(W. Heisenberg) 和苏联的伊万年科 (. . .) 独立发表原子核由质子和中子组成的假设 .1934 年 ,法国的约里奥·居里夫妇 (F. & I. Joliot Curie) 用 α 粒子轰击原子核 ,发现人工放射性 .意大利物理学家费米 (Enrico Fermi) 用中子轰击能够得到的所有元素 ,在短短几个月中发现了 60 多种新的人工放射性核素 ,很快跑到世界原子核研究的前列 .1938 年秋 ,德国放射化学家、德国威廉皇帝化学研究所

* 1998 - 05 - 25 收到