

值(如 2.5meV)增强到高场时单量子阱中的束缚能(如 50 Å 阱的 8meV)。实验上观察到的吸收边的蓝移是 $\frac{1}{2}(\Delta_c + \Delta_v) - (E_b^{QW} - E_b^{SL})$ 。

利用超晶格的 Wannier-Stark 局域化效应, Bigan 等人已做出驱动电压只有 0.8V 的 1.55 波段波导型调制器,其消光比为 20dB,损耗为 3dB^[22]。

- [1] D. A. B. Miller et al., *Phys. Rev. Lett.*, **53**(1984), 2173.
 [2] D. A. B. Miller et al., *Phys. Rev. B*, **32**(1985), 1043.
 [3] G. Bastard et al., *Phys. Rev. B*, **28**(1983), 3241.
 [4] 朱龙德等, *半导体学报*, **11-3**(1990), 202.
 [5] Y. Kan et al., *IEEE J. Quant. Electron.*, **QE-23**(1987), 2167.

- [6] M. Yamanishi and I. Suemune, *Japan. J. Appl. Phys.*, **23**(1984), L35.
 [7] H. Nagai et al., *Japan. J. Appl. Phys.*, **25**(1986), L640
 [8] J. E. Jucker et al., *Appl. Phys. Lett.*, **52**(1988), 945.
 [9] J. E. Jucker, *SPIE*, **994**(1988), 142.
 [10] J. E. Jucker et al., *Appl. Phys. Lett.*, **54**(1989), 10.
 [11] A. Von Lehmen et al., *Phys. Rev. B*, **35**(1987), 6479.
 [12] H. Yamamoto et al., *Electron. Lett.*, **21**(1985), 579.
 [13] H. C. Casey and M. B. Panish, *Heterostructure Lasers*, Part A, New York, Academic, (1978), 146.
 [14] J. Shimizu et al., *Appl. Phys. Lett.*, **53**(1988), 86.
 [15] R. J. Deri et al., *Appl. Phys. Lett.*, **53**(1988), 1803.
 [16] U. Koren et al., *Appl. Phys. Lett.*, **50**(1987), 368.
 [17] U. Koren et al., *Appl. Phys. Lett.*, **53**(1988), 2132.
 [18] J. E. Jucker et al., *Appl. Phys. Lett.*, **55**(1989), 2280.
 [19] K. G. Ravikumar et al., *Electron. Lett.*, **24**(1988), 415.
 [20] J. Bleuse et al., *Phys. Rev. Lett.*, **60**(1988) 220.
 [21] G. H. Wannier, *Rev. Mod. Phys.*, **34**(1962), 645.
 [22] E. Bigan et al., *Appl. Phys. Lett.*, **57**(1990), 327.

稳定的转换效率

——非晶硅太阳能电池的新课题

李长健 高卫东 徐温元

(南开大学电子系,天津 300071)

从 1976 年开始,非晶硅太阳能电池有了惊人飞速的发展,但是至今它的严重的光致衰退一直妨碍着它的实际应用。本文首先回顾了非晶硅太阳能电池的发展历史,提出了妨碍非晶硅电池发展的关键问题——稳定效率问题,介绍了提高稳定效率的措施,同时介绍了 CuInSe₂/CdS 太阳能电池等新型电池。

一、非晶硅太阳能电池的发展简史

1976 年,美国的 Carlson 和 Wronski 报道了第一个非晶硅太阳能电池的问世^[1]。短短 15 年,非晶硅太阳能电池飞速发展,世界各大国都投入相当多的人力和物力进行研究,使非晶硅太阳能电池不只在各实验室中有广泛的研究,而且很快达到商品化,成为光伏工业中一支重要的生力军。

1980 年,日本三洋公司首先研制出串联集成型非晶硅太阳能电池并用于手表和小型计算器上,使非晶硅太阳能电池在民用产品方面跨出了一大步,也使非晶硅太阳能电池的工业产量大幅

度增长。图 1 给出 1983 到 1988 年世界非晶硅太阳能电池产量占世界上单晶、多晶和非晶硅太阳能电池总产量的比例^[2]。在 1983 年非晶硅太阳能电池产量占世界电池产量的 14.3%,到 1987 年就增加到 37.4%。到 1988 年这个比例又跃增到 53%。可见其发展之快。

与此同时,非晶硅太阳能电池的光电转换效率也逐年增加。1988 年,小面积单结非晶硅太阳能电池的效率已达 12%,而叠层电池的效率高达 15.6%,如图 2 所示^[2]。我国非晶硅太阳能电池的研究经过“六五”和“七五”攻关,其技术水

1) Yukinori Kuwano, Progress of Amorphous Silicon Solar Cells 4th PVSEC, (1989).

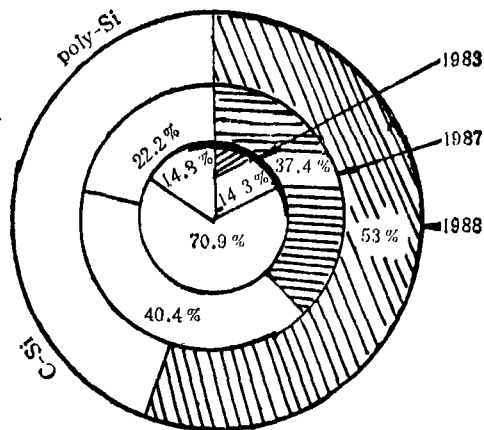


图1 世界太阳能电池的产量比例

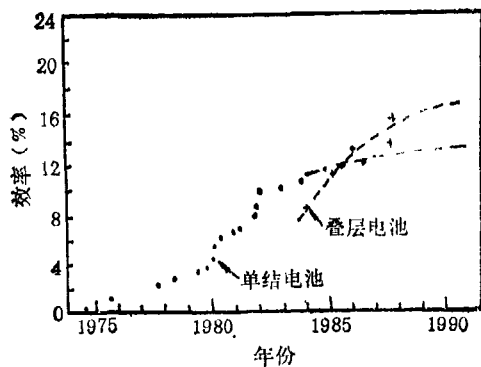


图2 a-Si 太阳能电池的效率曲线
叠层电池为 a-Si/CIS 电池; $\eta_{max} = 15.6\%$

平已接近 80 年代末的国际水平,如表 1 所示。

二、稳定效率

非晶硅太阳能电池获得如此迅速发展的原因,在于它可用连续工业化生产制成具有优良光电特性的薄膜材料,面积大,成本低。一段时

表 1 我国 a-Si 电池的转换效率

	面 积	效率 (η)
单结小面积	1cm ²	11.20%
多结小面积	1cm ²	11.40%
单结大面积	100cm ²	8.55%
单结大面积	400cm ²	7.88%
单结大面积	900cm ²	6.10%

期以来,人们把它作为大面积、高效率、低成本太阳能电池的主攻材料。虽然早已知道非晶硅太阳能电池的稳定性不够理想,但是在电池初始参数不断提高的情况下,人们信心百倍地继续研究,希望它能尽早成为光伏工业的主流。到目前为止,小面积单结电池的转换效率仍然徘徊在 12% 左右,而且大量实验数据表明,单结非晶硅太阳能电池转换效率的衰退比较严重。美国太阳能研究所测量的资料表明,各种单结非晶硅太阳能电池的光致衰退约在 30% 范围,各种多结非晶硅太阳能电池的转换效率的衰退也在 15% 左右。这就是说,我们制造的效率为 12% 的太阳能电池,经过一段时间光照之后,其光电转换效率只剩下 8% 左右。表 2 给出美国太阳能研究所对多结电池稳定性测量的结果。因此,许多专家认为,用目前在稳定性方面存在问题的材料和电池结构,即使制出效率为 15% 的太阳能电池,工业部门也不会感兴趣。在这种背景下,美国、日本等非晶硅太阳能电池生产大国都在调整自己的发展规模,使 1990 年非晶硅太阳能电池的总产量下降到 14.7MW,只占太阳能电池总产量 46.5MW 的 31.6%。严酷的现实使人们冷静地提出“稳定效率”的概念,即经过光致衰退而达

表 2 美国太阳能所实际测量的结果 (1987—1990)

单 位	电 池 类 型	初始效率(%)	光照(天)	衰退(%)	稳定效率(%)
克罗纳	a-Si/a-Si (双结)	5	961	26—30	3.7—3.5
克罗纳	a-Si/a-Si (双结)	5.3—5.9	390	22—33	4
索莱克斯	a-Si/a-Si (双结)	5.6—5.7	741	30—32	3.9
索莱克斯	a-Si/a-Si/a-SiGe (三结)	9	125	15	7.5

到稳定不变以后的光电转换效率。只有稳定效率才具有现实意义。因此，现在非晶硅太阳能电池的研究和开发所追求的目标应当是提高其稳定效率。这包含两个内容：第一仍然是设法提高初始效率，第二是设法减少光致衰退。

稳定效率的提法，把人们对非晶硅太阳能电池研究工作的重点转向解决其稳定性问题。具体地说，就是要研制出高效率、高稳定性的非晶硅太阳能电池，使之能稳定地工作 20—30 年，达到目前单晶硅太阳能电池稳定性的水平。

三、提高稳定效率的措施

提高非晶硅太阳能电池的稳定效率，主要是从提高其稳定性以减少光致衰退入手。为此要在提高材料质量和改进电池结构两方面努力。材料的问题主要是降低其中氧和氮元素的含量，并减少 $\text{Si}\cdot\text{H}_2$ 键的密度。由于影响材料性能的因素是错综复杂的，尽管十几年来科学家们作了大量工作，到目前为止尚无一种十分肯定的看法，足以用于非晶硅太阳能电池工业上，以根本解决材料的稳定性。从电池结构上看，主要是减薄 i 层厚度。由于 i 层薄了，在 i 层中光生载流子的复合减少了，光致退化也就小了。但是，薄 i 层不能充分吸收阳光，电池的初始转换效率也就有所降低。于是人们设法作成多结串联电池，即用多个具有薄 i 层的 a-Si 电池沿阳光入射方向串联起来，使其总的初始光电转换效率提高到厚 i 层电池的水平，而稳定性却大为改善。当然串结电池也可以不全是 a-Si 电池，而是其他材料的电池如 a-Si_xGe_{1-x}，a-Ge:H 和 CdS/CIS 等不同材料的太阳能电池，其结构形式如图 3 所示。

值得提出的是图 3(c) 所示的 CdS/CIS 太阳能电池，它是 70 年代出现的三元化合物电池；近年来有非常迅速的发展，原因是它也是薄膜电池，即可作成大面积，又具有降低成本的巨大潜力，令人感兴趣的是它具有非常好的稳定性。目前已进行的实验表明，在 500 天阳光照射下，效率几乎不变。现在正进一步研究，证实其稳定性是否和晶体硅电池一样。当前小面积 CIS

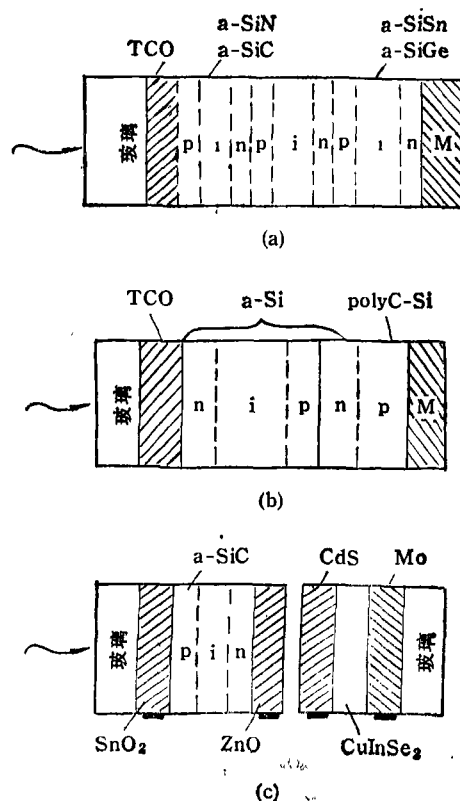


图 3 串联电池的结构

电池的效率已达 14.1%，小型组件的效率也达 11%，所以 CdS/CIS 电池是薄膜太阳能电池中的新的强有力的竞争者。图 3(c) 的结构也与其他串联电池不同，它具有四个引出电极，故称为四端电池，这种结构的优点在于串接的上下两个电池可以分别输出功率。

非晶硅太阳能电池的发展历史还不到 20 年，从无到有，从小到大，发展到今天的规模，应当说是很迅速的，表明它具有开发利用的内在潜力。由于稳定性问题目前未能根本解决，似乎出现某种波折。科学工作者认识到这个问题的本质，并调整自己的部署，把研究工作的重点转移到稳定效率。可以认为这是非晶硅太阳能电池发展史上的转折，相信不久的将来就会有新的成果公诸于世。

- [1] D. E. Carlson and C. R. Wronski, *Appl. Phys. Lett.*, 28(1976), 671.
- [2] David E. Carlson, *IEEE Tran. Electr. Devices*, ED-36-12(1989), 2775.