

doi:10.3969/j.issn.0253-9608.2010.03.003

面向下一代光伏产业的硅太阳能电池研究新进展

沈文忠

教授,上海交通大学太阳能研究所,上海 200240

* 科技部国家重大科学研究计划(纳米研究计划)课题(2010CB933702);上海市优秀学科带头人计划(08XD14022)

关键词 硅太阳能电池 纳米晶 纳米线 多重激子效应

以晶体硅为代表的第一代太阳能电池和以非晶硅薄膜为代表的第二代薄膜太阳能电池目前是光伏市场主流。第三代纳米结构太阳能电池研发目标是在维持现有第二代薄膜电池沉积技术的经济性和环保性基础上显著提高电池性能及稳定性,进一步降低太阳能电池的价格至每瓦 0.5 美元,甚至 0.2 美元及更低。笔者将简要综述近年来国际上面向下一代光伏产业的硅太阳能电池研究新进展,内容集中在纳米硅薄膜叠层太阳能电池、硅纳米线(包括轴向、径向和单根)太阳能电池和基于多重激子效应的纳米硅热载流子太阳能电池等三个方面。

1 前言

近年来,以晶体硅为代表的第一代太阳能电池(目前光电转换效率 16%~18%,占光伏市场份额 85%)产量以超过 40% 的速度高速增长,2007 年全球产量已达到 4 GW,2009 年超过 10 GW。中国光伏产业发展更加惊人,2007 年以 1.088 GW 的产量一举跃居世界首位,2009 年的产量达到 4.0 GW,稳居世界第一;无锡尚德在不到五年时间内已经跻身世界前三名,成为中国光伏产业的领跑者。最近三年,数十家光伏企业如雨后春笋般迅速崛起引起了全世界的关注。虽然 2008 年第四季度起全球金融危机使晶体硅材料的价格大幅降低,但目前晶体硅太阳能电池的价格仍然每瓦超过 1.5 美元,这为第二代薄膜太阳能电池的发展提供了良好的机遇。目前以非晶硅薄膜为代表的第二代薄膜太阳能电池产业化正如火如荼地进行,电池转换效率~8%,非均匀性优于 7%,太阳能电池的价格低于每瓦 1.0 美元。但是非晶硅薄膜太阳能电池的最大问题是光电转换效率比较低,而且随着时间的推移(一般十几天),它的性能会出现光致衰退现象(即所谓的 Staebler-Wronski 效应^[1]),其短路电流、转换效率等也随着下降。随着全球纳米科学的快速

发展,纳米技术日渐成熟,降低太阳能电池成本,提高光电转换效率和稳定性的一个重要思想是利用纳米技术。纳米结构材料成为新颖的太阳能电池材料,它的应用将给蓬勃发展的太阳能光伏产业注入新的活力,形成所谓的第三代纳米薄膜太阳能电池的研究热潮^[2],目标是在维持现有第二代薄膜电池沉积技术的经济性和环保性基础上显著提高电池性能及稳定性,进一步降低太阳能电池的价格至每瓦 0.5 美元,甚至 0.2 美元及更低(图 1)。笔者将简要综述近年来国际上面向下一代光伏产业的硅太阳能电池研究新进展,内容集中在纳米硅薄膜叠层太阳能电池、硅纳米线太阳能电池和基于多重激子效应的纳米硅热载流子太阳能电池等三个方面。

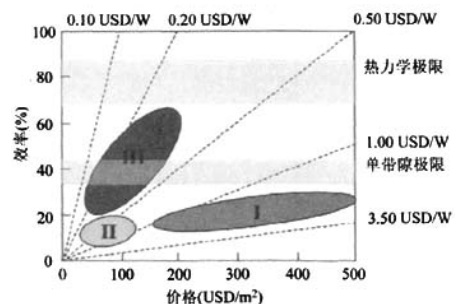


图 1 三代(I、II、III)太阳能电池的光电转换效率与价格间的关系

编者按:2010 年在中国上海召开的世博会是各国展示先进科技的平台,本刊特设能源、环境等专题予以集中报道。太阳能光伏是世博科技的重要项目之一,本刊邀请上海交通大学太阳能研究所所长沈文忠教授负责组稿,五篇论文全面介绍太阳能光伏技术的最新进展,内容包括光伏产业发展趋势、晶体硅太阳能电池产业化技术进步、新一代薄膜电池研发进展、光伏系统与应用及下一代太阳能电池技术前沿。

2 纳米硅薄膜叠层太阳电池

硅材料在太阳电池中的主流地位决定了纳米硅薄膜太阳电池在未来第三代太阳电池中的角色和地位。纳米硅薄膜是一种包含有非晶硅相和晶体硅纳米颗粒(量子点)的二相体系。和传统非晶硅薄膜的制备技术相容,纳米硅薄膜可以通过等离子体增强气相沉积(PECVD)在不超过 300 °C 的温度下制备,只需要通过增加反应气体中的氢稀释比,非常有利于降低生产成本,也有利于在柔性衬底上制备太阳电池,而且其耐高温性能优于晶体硅电池。纳米硅材料的载流子迁移率、电导率和光学吸收系

数都比多晶硅和非晶硅高,其光学带隙也可由纳米尺度效应调节到高效理想太阳电池所需要的带隙区域。同时在纳米硅中,氢对光照产生的额外悬挂键缺陷起到了有效的钝化作用,晶化作用使纳米硅内部的弱 Si-Si 键或者 Si-H 键数量大大降低^[3],因此纳米硅太阳电池的性能和稳定性比起非晶硅太阳电池有了明显的提高。美国 United Solar Ovonic 公司已经在实验室中尝试用纳米硅薄膜代替其中的底部和中间非晶锗硅结电池^[4](图 2(a, b)),利用长波的红光对纳米硅结电池几乎没有光致衰退现象这一特点,明显改善了电池性能的稳定性的特点,明显改善电池性能的稳定性的特点,并进一步发现小型硅颗粒和有序纳米结构有利于晶界钝化,从而提高电池性能。

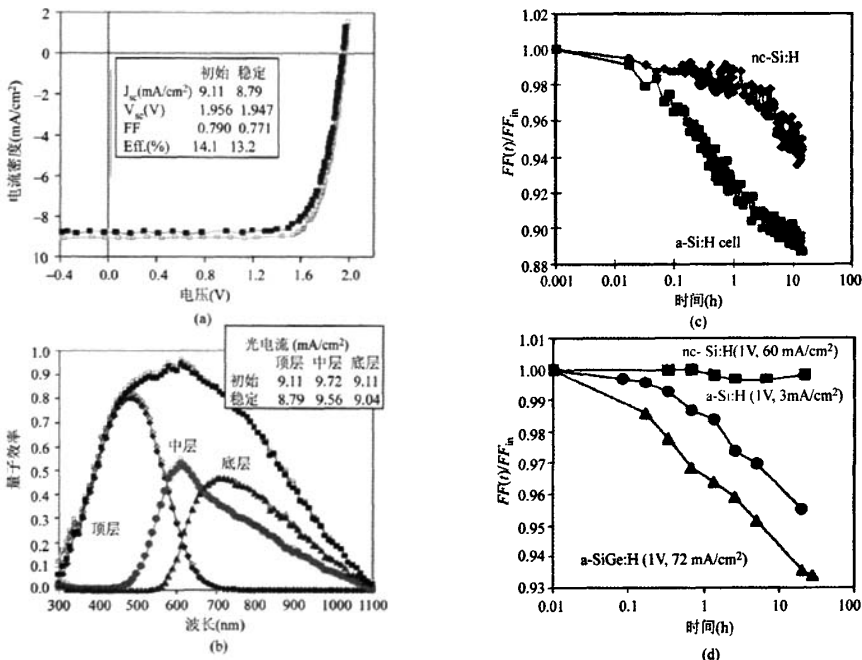


图 2 非晶硅/纳米硅三结薄膜太阳电池的性能(a, b)及稳定性(c, d)

在探索提高纳米硅结构有序程度的大量实验和理论工作中,人们逐渐认识到氢在硅晶粒的生长过程中起着至关重要的作用。对生长过程中氢原子与硅原子相互作用微观调控的深层次认识,可以通过合理控制生长条件,在优化的衬底材料和衬底温度下生长出均匀有序的镶嵌在氢化非晶硅网络中的纳米硅薄膜结构。上海交通大学太阳能研究所利用改进的 PECVD 方法,通过控制射频功率和反应气压,在 250 °C 的单晶硅衬底上成功地制备出均匀有序的硅量子点结构,其中硅纳米晶粒之间的非晶硅晶界极薄,厚度仅 2~4 个原子层。在这

样的有序纳米结构中,不仅获得了优异的结构性能、与单晶硅可比的高室温电子迁移率(超过 100 cm²/Vs)(图 3(a))、纳米硅/单晶硅异质界面上的二维电子气^[5]和电子退相干特性,而且还观察到体系中明显的量子共振隧穿现象和纳米结构中周期性负微分电导现象。同时,从体系纳米尺度三维势阱新型能带结构(由非晶硅晶界中缺陷态导致的硅晶粒内部载流子耗尽所形成)出发,成功实现不同浅能级掺杂浓度对能带结构的调控^[6]及对量子共振隧穿现象的调控。在光学特性方面,通过生长条件调节晶粒大小或掺杂浓度,借助于纳米尺度效应

调控纳米硅薄膜材料的光学带隙,已经实现纳米硅的带隙在高效理想太阳能电池所需的 1.7~1.8 eV 左右^[7]以及体系中较强的室温可见发光。在光电响应方面,揭示出由于纳米晶粒中光吸收截面的增大以及载流子电导率的提高,纳米硅薄膜与晶体硅相比具有更强的光吸收

和更大的光电流^[8-9](图 3(b))。在太阳能电池研发方面,研制的小面积渐变带隙纳米硅薄膜太阳能电池初始效率达到 11.4%(AM1.5(AM: air mass 空气量), 1000 W/m², 25 °C)的国际先进水平,获得第 15 届 PVSEC(国际光伏科学与工程大会)优秀奖。

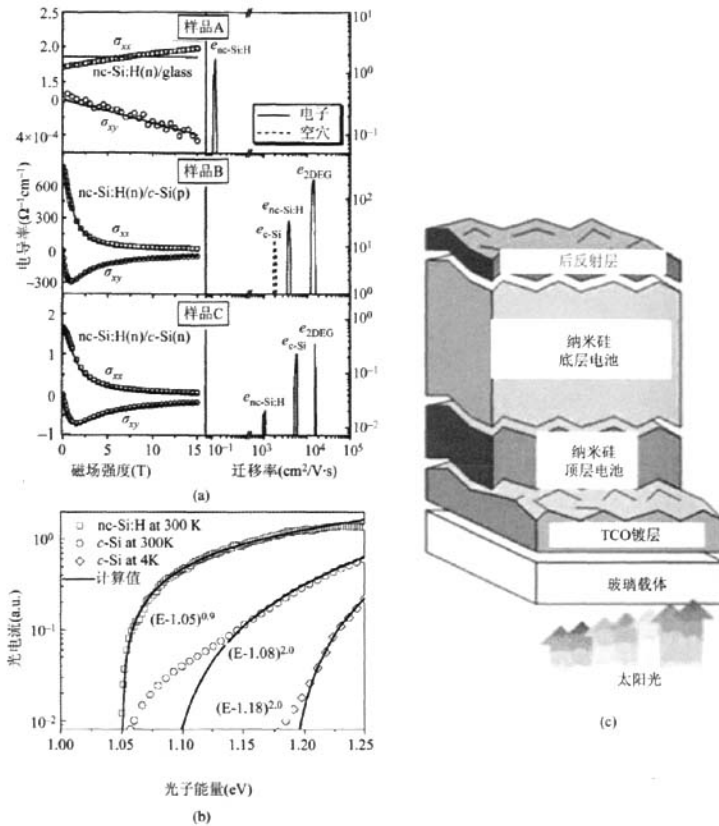


图 3 (a) 纳米硅薄膜优良的电学输运, (b) 光电特性以及 (c) 叠层纳米硅薄膜太阳能电池结构

目前,纳米硅薄膜太阳能电池研发的机遇与挑战主要包括两方面:在薄膜材料制备方面,要求生长出高度有序和高迁移率的纳米硅薄膜,并在产业化需求的快速沉积和面积均匀生长方面取得突破;在电池研制方面,重点研发已经有较好产业化前景的叠层纳米硅薄膜太阳能电池。理论分析发现,在单结太阳能电池中入射太阳光能量的 20% 左右损失在低于材料带隙光子的不吸收上面,而 40% 左右损失在高于材料带隙的热载流子晶格热离化上面。叠层多结太阳能电池设计是一种非常简单而又有效的解决办法,目的是使不同能量的太阳光子被不同带隙的结电池所吸收,从而有效地提高太阳光子的利用效率。可以利用已经实现的均匀有序、高迁移率纳米硅薄膜材料构筑叠层多结纳米硅薄膜太阳能电池。典型的双结结构

如图 3(c) 所示:在透明导电薄膜(TCO)上沉积顶层和底层纳米硅薄膜 p-i-n 结电池,分别吸收 2.0 eV 和 1.5 eV 的太阳光子,其带隙是由硅量子点的尺寸来调节控制的。在这种电池中由于没有非晶硅,电池性能的稳定性会比较好,预计不久的将来会有较好的产业化前景。具体技术路线包括采用 PECVD 技术来实现硅基薄膜的纳米晶化和可控生长:精确控制每一膜层厚度、掺杂浓度、晶态比及其它相关物性,实现可控晶态比、可控纳米晶粒尺寸、可控禁带宽度和可控生长速度,为实现高光电转换效率的光伏电池提供强有力的材料支撑;利用反应等离子体沉积获得高品质 TCO 和缓冲层材料,包括受光面高陷光效应、高透光率和电导率 TCO 膜与硅薄膜的界面优化。系统设计的先进性可以实现低成本、高产率和高稳

定效率的纳米硅薄膜太阳能电池。

3 硅纳米线太阳能电池

半导体纳米线因其独特的光学和电学特性近年来引起了科研工作者的广泛关注,在太阳能电池方面具有很大的潜在应用价值。由于硅材料和工艺在半导体工艺中占有主流地位,与其它材料相比,硅纳米线太阳能电池的制作更容易与当前工艺兼容。目前硅纳米线太阳能电池的研究热点是硅纳米线阵列太阳能电池和单根硅纳米线太阳能电池。

结构最简单的硅纳米线电池就是直接在传统的晶体硅电池上制备合适的硅纳米线,以此作为减反层来增加光吸收从而提高电池的效率。人们通过理论分析和数值计算,发现半导体纳米线具有极低的光反射率^[10],纳米线的吸收在短波长更高,只是在长波长较低,不过可以通过延长纳米线的长度或陷光技术来弥补;并将这种光学特性归因于光在纳米线结构中的多次散射,同时指出通过优化纳米线的直径和合适的折射率匹配可以增强光的吸收、减少反射^[11]。实验上确实已证明了硅纳米线的反射率明显低于硅薄膜和晶体材料(图 4(a)),

通过对比硅纳米线与单晶硅、多晶硅等的反射率,发现硅纳米线的确在红外波段吸收显著增强,原因一方面是反射率的显著降低,另一方面是纳米线导致的缺陷等对光子具有更强的捕获能力^[12]。

最近,美国加州大学 Berkeley 分校研究组通过光透射和光电流的测量表明:有序纳米线阵列能够增加入射光光程,加强因子高达 73,优于其它散射方法^[13]。美国加州理工学院研究组设计了新的陷光技术:纳米线首先覆一层 Si_3N_4 , 随后沉积透明材料 Al_2O_3 纳米颗粒^[14], 这些纳米颗粒散射入射光进入纳米线以使吸收最大化。结果表明,用不到 5%的纳米线面积可以达到 96%的吸收,整天可以吸收 85%带隙以上的太阳光。同时,纳米线阵列也加强了近红外吸收,使整体光吸收超过对等的传统平板陷光限制(图 4(b))。美国斯坦福大学研究组研究了单根纳米线的漏模共振(LMRs)现象,指出纳米线光吸收不仅与材料的本征吸收有关,还可以通过控制纳米线的尺寸、几何形状和纳米结构的方向改变光吸收^[15]。他们又进一步研究了单根纳米线的光学天线效应,指出纳米线能够加强光吸收而几乎不依赖光照角度^[16](图 4(c)),这说明纳米线可以作为近乎完美的电池元素。

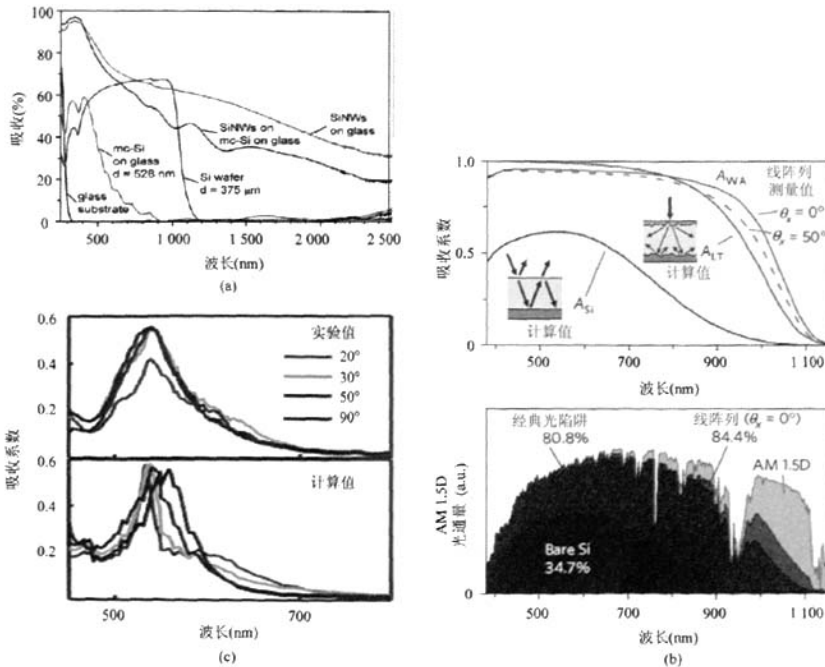


图 4 (a) 硅纳米线吸收与硅薄膜和晶体硅材料的对比, (b) 测量的硅纳米线吸收与等厚平面硅的理论吸收的对比, (c) 单根硅纳米线不同角度的实验和计算吸收谱

目前,平板晶体硅太阳能电池中单晶硅多采用各向异性碱性溶液织构,工艺成熟,多晶硅则采用酸性腐蚀,工艺还有待完善。硅纳米线的有效减反效应可以在传统的平板多晶硅太阳能电池中有很好的应用(图5)。清华大学研究组已经尝试采用无电极化学腐蚀技术制备硅纳米线用于晶体硅太阳能电池^[17],具体过程是先在p型晶体硅上制作规则排列的纳米线阵列,然后通过磷扩散形成n型区,形成p-n结,最后通过常规的电池工艺制作硅太阳能电池(图5(a))。实验结果发现纳米线结构能够显著降低光反射率,但这种平板硅纳米线阵列太阳能电池的转换效率仅为9.3%,而多晶硅电池为4.73%(图5(b))。可能的

问题在于表面电极接触不够致密,表面缺陷增加了表面电子-空穴复合速率。进一步将纳米线阵列的方向由垂直改成略微倾斜来改善表面电极接触,降低接触电阻,实验上已证明可以将电池转换效率提高到11.37%^[18]。以纳米线作为减反层的硅太阳能电池仍有很多问题要解决,如纳米线的制备和改善电极接触等等。此外,法国研究组将n型硅纳米线用化学气相沉积工艺和Vapor Liquid Solid (VLS)方法生长在p型衬底上,制作了硅纳米线阵列电池,效率为1.9%^[19](图5(c))。德国Jena光子技术研究组用无电极化学腐蚀法制作了轴向纳米线阵列电池,效率为4.4%^[20](图5(d))。

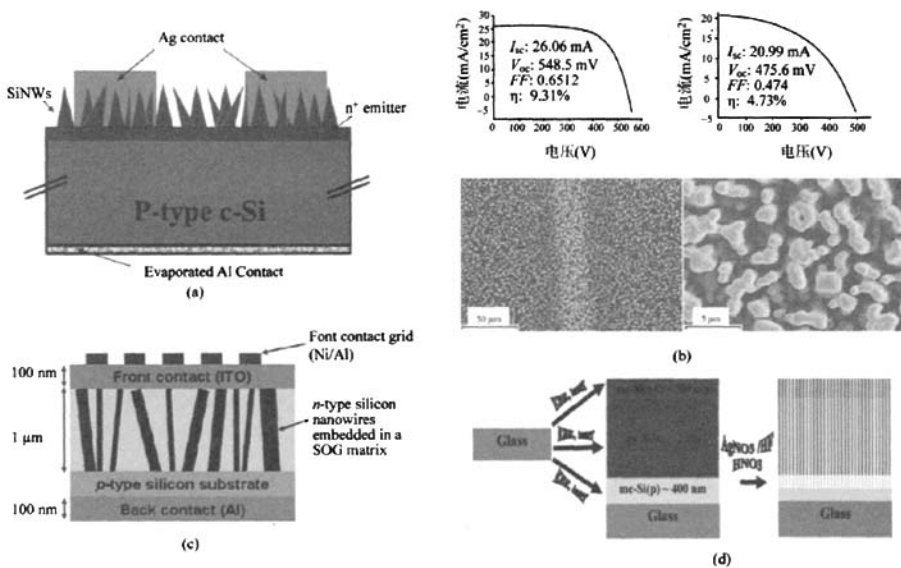


图5 (a,c,d)几种硅纳米线阵列电池结构,(b)硅纳米线阵列太阳能电池性能与表面形貌

相比上面几种纳米线阵列电池,美国加州理工学院研究组提出的径向p-n结的纳米线阵列太阳能电池^[21]具有更大的优势(图6(a)):入射光吸收的过程发生在电池轴向,有效增加了光程,提高光的吸收利用;载流子分离的过程发生在电池径向,减小了运输距离,提高光生载流子的收集效率,综合起来将显著提高电池的短路电流、转换效率等指标。此外,由于载流子的短距离运输可以有效减少电子空穴对的体复合,这类电池对硅材料的要求低于传统电池。理论计算表明,对于电子扩散长度为100 nm的径向硅纳米线,太阳能电池的效率可达11%,远高于平板结构的1.5%。美国加州大学Berkeley分校研究组首先利用低温蚀刻和薄膜沉积方法制作了径向硅纳米线电池,只是效率不到0.5%^[22]。最近,他们通过降低表面的粗糙程度和对纳米线直径和密度

的调控,大大提高了开路电压、影响因子和开路电压的值,光电转换效率达到5%^[13]。这将极有可能在低成本材料上实现较高的转换效率,将是未来新型纳米线太阳能电池的重要研究方向。

除了纳米线阵列电池,单根硅纳米线在光伏和纳电子器件应用方面也受到人们的重视。美国哈佛大学研究组用VLS方法和化学气相沉积工艺制作了径向硅p-i-n纳米线太阳能电池,电池效率达到3.4%,单根纳米线太阳能电池最大输出功率达到72 pW^[23](图6(b,c))。而单根硅纳米线也已成功制作成轴向单结甚至多结p-i-n太阳能电池结构,4.0 μm厚本征区的单结太阳能电池的效率为0.5%,输出功率仅4.6 pW^[24]。很清楚,这种轴向电池的效率和输出功率远低于前述的单根径向p-i-n太阳能电池。由此可见,具有径向p-i-n结的纳米线太阳电

池在载流子输运和收集方面确实展现出独特的优势。我们相信通过对单根纳米线的基础研究,能够阐释纳米

线阵列电池的主要性质,有利于设计新一代高性能纳米线阵列电池。

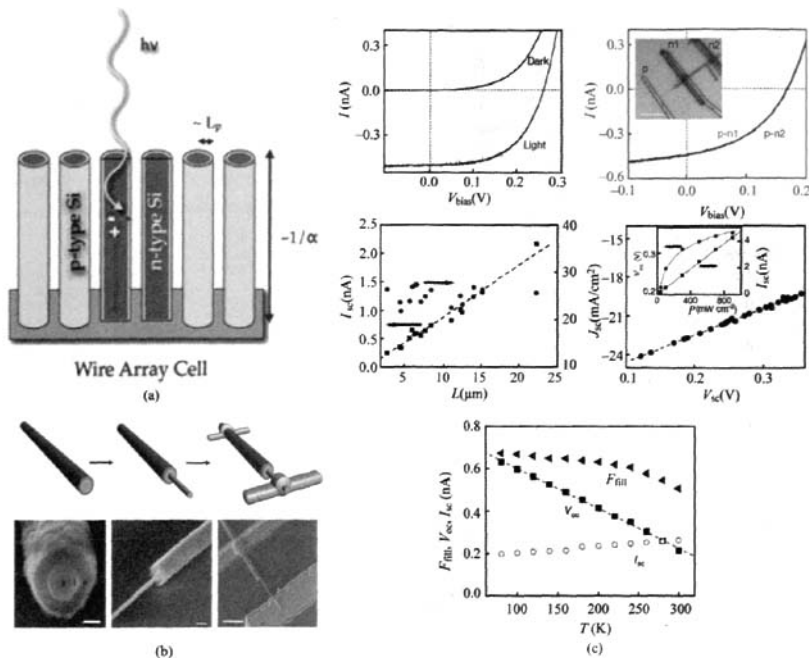


图6 (a)径向 p-n 结的纳米线太阳能电池结构示意图,单根径向硅 p-i-n 纳米线太阳能电池(b)结构及(c)性能

虽然硅纳米线太阳能电池理论上比传统电池具有更优的性能,但传统电池的理论与工艺相对成熟,而硅纳米线太阳能电池大多还处在实验室研究阶段。尽管近年来硅纳米线太阳能电池在理论和制备上已取得很大的进展,但在真正实用中还会有不少全新的问题出现,无论在基础机理还是工艺实现方面,都值得更深入地探讨与研究。可以预计的是,下一阶段具体技术路线包括:p-cores 硅纳米线的有序可控生长;利用优化的 PECVD 沉积 i-shell 和 n-shell;优化器件结构参数,包括掺杂、各层厚度、线直径和密度,并实现其有序可控生长;探索合适的欧姆接触和适合大规模生产纳米线阵列电池的工艺等。

4 基于多重激子效应的纳米硅热载流子太阳能电池

多重激子效应是指半导体材料吸收一个光子而产生多个电子-空穴对的过程(图7(a)),这种效应具有重要的基础研究意义和实际应用价值,涉及领域包括非线性光学、激光及光化学等,但特别相关的是光伏科学与应用方面。多重激子效应实际上早于20世纪50年代

就在半导体块体材料中就被发现,当时被称为载流子倍增效应,其产生机理被认为是碰撞电离机制,但由于其效率很低(不到1%)而被认为没有实际应用价值。2004年,Schaller 和 Klimov 首次报道半导体纳米结构中具有强烈的多重激子效应^[25],从而导致了半导体量子点结构中的多重激子效应得到了广泛而深入的研究。到目前为止,已在 PbSe, PbS, PbTe, CdSe, Si 和 InAs 等半导体纳米结构中观察到了明显的多重激子效应。发现在 0.5~3.5 eV 的地面太阳光谱区域内,硅纳米晶会发生很强的多重激子效应,光子域值为 2.4 倍带隙,并在 3.4 倍带隙处量子产额达 260%^[26],远好于晶体硅(图7(b))。在纳米结构多重激子效应产生机理理论研究方面,提出了虚拟激子产生理论、相干多重激子模型及碰撞电离机制等。除了相干多重激子模型所预言的相干现象没有被观察到以外,这些理论在解释多重激子现象上都是比较成功的。因此,多重激子效应已被国际学术界公认为是半导体纳米结构体系中普遍存在的现象。最新的研究进展是2009年报道的有特色 PbS 纳米结构光电探测器^[27]和纳米碳管光电二极管^[28]直接利用了多重激子效应提高其器件性能。当然,目前对于半导体纳米结构中多重激子效应

的实验结果也出现了很多争议,主要集中在三个方面:①半导体纳米结构中的多重激子效应是否真的高效率存在? 如果存在,其真正效率是多少? ②半导体纳米结构

中的多重激子效率是否一定高于相应块体材料中的多重激子效率? ③是什么因素决定了半导体中多重激子效应的阈值能量,这个阈值是多少?

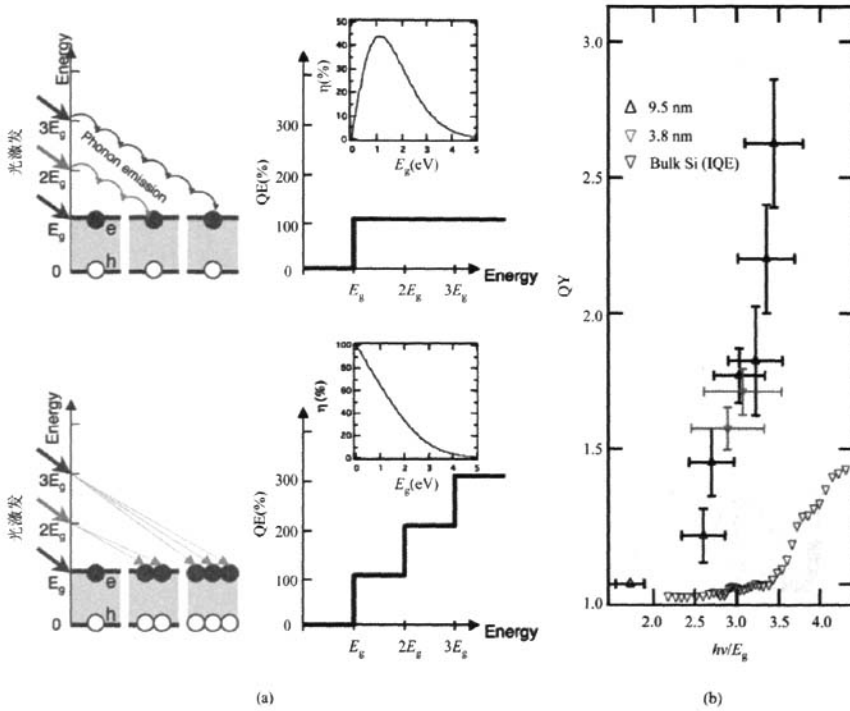


图7 (a)一个光子产生单个和多个电子-空穴对的过程示意图,(b)硅纳米结构和体材料中的多重激子效应

一般情况下,吸收一个光子只能产生单个激子,高激发能量的光子通过声子发射而浪费掉了。如果能实现一个光子产生多个激子(图 8(a)),必将能充分利用高能量光子从而明显提高电池转换效率,因此,纳米材料中的多重激子效应可以进一步提高太阳电池的光电转换效率^[29]。理论计算表明:在 PbSe 纳米晶中,这种新型电池的转换效率有望提高 50%。因此,除了叠层薄膜电池设计,基于多重激子效应的新概念热载流子太阳电池方案是最近国际研究的热点。这种新方案的主要目的是充分利用热弛豫到半导体带边前的热载流子,以明显提高电池的转换效率,实现通过碰撞电离产生二个(或更多)电子-空穴对这一途径增加光电流,要求碰撞电离的速率要比热载流子冷却和其他弛豫过程高。

现阶段,多重激子效应在硅纳米结构太阳电池上的应用创新研究还刚刚开始,目前还没有在纳米硅薄膜中观察到多重激子效应的报道。要实现这种多重激子效应热载流子太阳电池还有很多技术难题需要克服,最大

的困难是要求实现电荷的有效分离,其发生的时间要比多重激子产生的时间($10^{-13} \sim 10^{-12}$ s)长,但比双激子寿命(10^{-10} s)要短。毫无疑问,这种基于半导体多重激子效应的新型热载流子硅纳米结构太阳电池,一旦实现必将对现有的光伏科学与技术产生革命性的影响。我们知道,在量子点阵列 p-i-n 太阳电池中,量子点间电子波函数的耦合所形成的微带(miniband)(图 8(b))有利于减慢热载流子的冷却速率,使得热载流子可以在各自的 p 和 n 电极处传输并收集^[29-30]。值得高兴的是,在已经实现的均匀有序纳米硅薄膜中,由于非晶硅晶界极薄(厚度仅 2~4 个原子层),硅量子点间的电子波函数非常容易发生耦合,上海交通大学太阳能研究所在光电流谱实验研究中不仅观察到了非晶硅带尾态的跃迁,而且还清楚地证明纳米硅薄膜中微带的存在^[31](图 8(c)),这为开展纳米硅热载流子薄膜电池的探索研究提供了机遇。具体技术路线包括:利用优化的 PECVD 方法制备半导体纳米硅 p-i-n 薄膜太阳电池结构;通过光电流谱手段来表征器件在不同频率光照下的响应情况;探索

多重激子效应对电流、电压以及特定频率入射光的能量转换效率的影响;设计最佳方案来分离与收集纳米硅薄

膜电池中多重电子-空穴对,以提高纳米硅薄膜太阳能电池转换效率等。

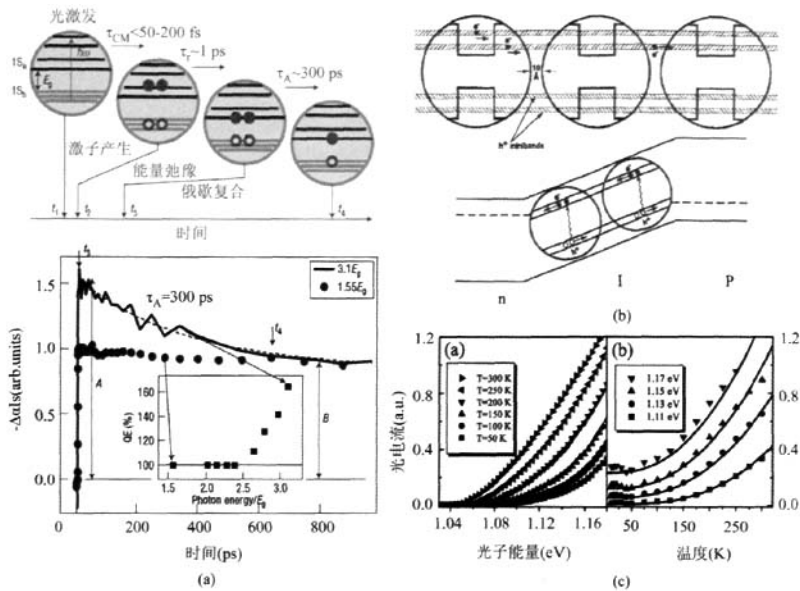


图8 (a)基于泵浦-探测实验的多重激子效应观察,(b)量子点阵列 p-i-n 太阳能电池结构中电子波函数耦合所形成的微带及(c)纳米硅薄膜中微带实验观察

5 结束语

从以上的简要综述中我们可以看到,国际上纳米技术在硅太阳能电池中的创新应用才刚刚起步,离产业化的要求还有很大距离,但千万不能小看其对未来光伏产业可持续发展的重要性。虽然中国已经是国际光伏产业大国,但绝不是光伏产业强国。当国际光伏创新研究如火如荼开展之时,我们一定要对中国光伏产业即将面临的严峻局面有清醒的认识。只有迎头赶上,在源头上创新,才能实现中国光伏产业强国之梦,引领国际光伏产业的发展。

致谢 研究工作得到了科技部国家重大科学研究计划(纳米研究计划)课题(2010CB933702)和上海市优秀学科带头人计划(08XD14022)的支持,研究生刘文富、苏未安和谢卫强协助做了不少工作,特此感谢。

(2010年4月30日收到)

[1] STAEBLER D L, WRONSKI C R. Reversible conductivity changes in discharge-produced amorphous Si [J]. Applied Physics Letters, 1977, 31(4): 292-294.
 [2] SOGA T. Nanostructured materials for solar energy conversion[M]. Elsevier, 2006, 131-192.

[3] SRIRAMAN S, AGARWAL S, AYDIL E S, et al. Mechanism of hydrogen-induced crystallization of amorphous silicon [J]. Nature, 2002, 418(6893): 62-65.
 [4] YANG J, YAN B J, GUHA S. Amorphous and nanocrystalline silicon-based multi-junction solar cells [J]. Thin Solid Films, 2005, 487(1-2): 162-169.
 [5] CHEN X Y, SHEN W Z, HE Y L. Enhancement of electron mobility in nanocrystalline silicon/crystalline silicon heterostructures [J]. Journal of Applied Physics, 2005, 97(2): 024305-1-5.
 [6] CHEN X Y, SHEN W Z. Controlling the electronic band structures in hydrogenated silicon nanocrystals by shallow impurity doping [J]. Physical Review B, 2005, 71(3): 035309-1-6.
 [7] CHEN H, SHEN W Z. Temperature-dependent optical properties of B-doped nc-Si:H thin films in the interband region [J]. Journal of Applied Physics, 2004, 96(2): 1024-1031.
 [8] ZHANG R, CHEN X Y, ZHANG K, et al. Photocurrent response of hydrogenated nanocrystalline silicon thin films [J]. Journal of Applied Physics, 2006, 100(10): 104310-1-5.
 [9] ZHANG R, WU H, CHEN X Y, et al. Electronic states in Si nanocrystal thin films [J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(24): 242105-1-3.
 [10] HU L, CHEN G. Analysis of optical absorption in silicon nanowire arrays for photovoltaic applications [J]. Nano Letters, 2007, 7(11): 3249-3252.
 [11] MUSKENS O L, RIVAS J G, ALGRA R E, et al. Design of light scattering in nanowire materials for photovoltaic applications [J]. Nano Letters, 2008, 8(9): 2638-2642.

- [12] STELZNER T, PIETSCH M, ANDRA G, et al. Silicon nanowire-based solar cells [J]. *Nanotechnology*, 2008, 19 (29): 295203-1-4.
- [13] GARNETT E, YANG P D. Light trapping in silicon nanowire solar cells [J]. *Nano Letters*, 2010, 10(3): 1082-1087.
- [14] KELZENBERG M, BOETTCHER S, PETYKIEWICZ J, et al. Enhanced absorption and carrier collection in Si wire arrays for photovoltaic applications [J]. *Nature Materials*, 2010, 9(3): 239-244.
- [15] CAO L, WHITE J S, PARK J-S, et al. Engineering light absorption in semiconductor nanowire devices [J]. *Nature Materials*, 2009, 8(8): 643-647.
- [16] CAO L, FAN P, VASUDEV A P, et al. Semiconductor nanowire optical antenna solar absorbers [J]. *Nano Letters*, 2010, 10(2): 439-445.
- [17] PENG K Q, XU Y, WU Y, et al. Aligned single-crystalline Si nanowire arrays for photovoltaic applications [J]. *Small*, 2005, 1(11): 1062-1067.
- [18] FANG H, LI X D, SONG S, et al. Fabrication of slantingly-aligned silicon nanowire arrays for solar cell applications [J]. *Nanotechnology*, 2008, 19(25): 255703-1-6.
- [19] CERVENKA J, LEDINSKY M, STUCHLIKOVA H, et al. Full process for integrating silicon nanowire arrays into solar cells [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2009, 93(9): 1568-1571.
- [20] SIVAKOV V, ANDR G, GAWLIK A, et al. Silicon nanowire-based solar cells on glass; synthesis, optical properties, and cell parameters [J]. *Nano Letters*, 2009, 9(4): 1549-1554.
- [21] KAYES B M, ATWATER H A, LEWIS N S. Comparison of the device physics principles of planar and radial p-n junction nanorod solar cells [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97 (11): 114302-1-11.
- [22] GARNETT E, YANG P D. Silicon nanowire radial p-n junction solar cells [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2008, 130(29): 9224-9225.
- [23] TIAN B Z, ZHENG X L, KEMPA T J, et al. Coaxial silicon nanowires as solar cells and nanoelectronic power sources [J]. *Nature*, 2007, 449(7164): 885-889.
- [24] KEMPA T J, TIAN B Z, KIM D R, et al. Single and Tandem Axial p-i-n Nanowire Photovoltaic Devices [J]. *Nano Letters*, 2008, 8(10): 3456-3460.
- [25] SCHALLER R D, KLIMOV V I. High efficiency carrier multiplication in PbSe nanocrystals: implications for solar energy conversion [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(18): 186601-1-4.
- [26] BEARD M C, KNUITSEN K P, YU P R, et al. Multiple exciton generation in colloidal silicon nanocrystals [J]. *Nano Letters*, 2007, 7(8): 2506-2512.
- [27] SUKHOVATKIN V, HINDS S, BRZOZOWSKI L, et al. Colloidal quantum-dot photodetectors exploiting multiexciton generation [J]. *Science*, 2009, 324(5934): 1542-1544.
- [28] GABOR N M, ZHONG Z, BOSNICK K, et al. Extremely efficient multiple electron-hole pair generation in carbon nanotube photodiodes [J]. *Science*, 2009, 325(5946): 1367-1371.
- [29] NOZIK A J. Quantum dot solar cells [J]. *Physica E*, 2002, 14 (1-2): 115-120.
- [30] BROWN G F, WU J Q. Third generation photovoltaics [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2009, 3(4): 394-405.
- [31] ZHANG R, CHEN X Y, LU J J, et al. Photocurrent of hydrogenated nanocrystalline silicon thin film/crystalline silicon heterostructure [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 102 (12): 123708-1-5.

Silicon Solar Cells; New Achievements for Next Generation PV Industry

SHEN Wen-zhong

Professor, Institute of Solar Energy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract Both the first generation crystalline Si and the second generation non-crystalline Si thin film solar cells dominate the current photovoltaic (PV) industry. The third generation nanotechnology approaches aim to decrease costs to well below 1.0 USD/W level of second generation PVs to 0.5 USD/W, potentially to 0.2 USD/W or better, by significantly increasing efficiencies but maintaining the economic and environmental cost advantages of thin-film deposition techniques. In this paper, we present a brief review on the recent achievements in Si nanocrystalline and nanowire solar cells as the future PV industry may belong to these nanostructured Si solar cells. The emphasis is on hydrogenated nanocrystalline silicon (nc-Si:H) tandem thin film solar cells with the band gap tuned by the dot size, the preliminary application of Si nanowire arrays in planar Si solar cells and radial Si solar cell concept including single nanowire Si solar cells, and multiple exciton generation nc-Si:H hot carrier solar cells.

Key words Si solar cell, nanocrystalline, nanowire, multiple exciton generation

(责任编辑:方守狮)

(上接第 160 页)

- [17] DAI S, WENG J, SUI Y, et al. The design and outdoor application of dye-sensitized solar cells [J]. *Inorganica Chimica Acta*, 2008, 361(3): 786-791.

Status and Trends of Thin Film Solar Cells

ZHAO Ying^①, DAI Song-yuan^②, SUN Yun^③, FENG Liang-huan^④

①③ Professor, Institute of Photo-Electronics Device and Technology, Nankai University, Tianjin 300071, China; ② Professor, Institute of Plasma Physics Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; ④ Professor, College of Materials Science and Engi-

neering, Sichuan University, Chengdu 610064, China

Abstract Thin film solar cells (TFSC) are a promising approach for terrestrial photovoltaics and offer a wide variety of choices in terms of the device design and fabrication. The authors analyse the current status of TFSC and their future developments. Research and production progress of silicon based thin film solar cells, CdTe and Cu(In, Ga)Se₂ solar cells, and dye-sensitized solar cells in China are introduced.

Key words silicon based thin film solar cell, CdTe solar cell, CIGS solar cell, dye-sensitized solar cell

(责任编辑:沈美芳)