

异质结及其技术在新型硅基太阳能电池中的应用^{*}

陈晨 贾锐[†] 朱晨昕 李维龙 李昊峰 刘明 刘新宇 叶甜春

(中国科学院微电子研究所纳米加工与新器件集成技术实验室 北京 100029)

摘要 文章综述了异质结及其技术在新型硅基太阳能电池中的应用. 从太阳能电池特性角度, 点评了其在晶体硅、非晶硅薄膜太阳能电池及新结构太阳能电池应用中的研究热点和研究现状. 在此基础上, 讨论了其在不断与晶体硅、薄膜硅太阳能电池融合中的发展动态.

关键词 异质结, 太阳能电池, 晶体硅, 非晶硅, 薄膜

Heterojunction technology for novel silicon-based solar cells

CHEN Chen JIA Rui[†] ZHU Chen-Xin LI Wei-Long LI Hao-Feng
LIU Ming LIU Xin-Yu YE Tian-Chun

(Key Laboratory of Nano-fabrication and Novel Devices Integrated Technology, Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract The application of heterojunction technology to novel silicon-based solar and photovoltaic cells is reviewed. The performance of mono-crystalline as well as thin-film silicon solar cells based on heterojunction technology is discussed in detail. Moreover, the shortcomings and current problems that need further improvement are critically addressed. We conclude by reviewing the future prospects of these new heterojunction structure silicon-based solar cells.

Keywords heterojunction, solar cells, crystalline silicon, amorphous silicon, thin film

1 引言

异质结是由两种禁带宽度不同的半导体材料相接触而形成的接触过渡区^[1]. 1992年, 日本人 Makoto Tanaka 和 Mikio Taguchi 等^[2]首次将异质结技术应用到硅基太阳能电池的制备过程中. 自此, 异质结技术与太阳能电池的结合成为新型硅基太阳能电池发展的趋势之一, 得到了广泛的研究和应用.

当今, 世界对可再生能源的需求空前迫切. 作为重要的可再生能源之一, 太阳能及其光伏产业受到我国政府^[3]和企业的极大关注. 自1954年第一块单晶硅同质PN结太阳能电池^[4]的诞生至今, 硅基太阳能电池经历了两个阶段: 以晶体硅和多晶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

二代太阳能电池^[5]. 然而, 传统的基于同质PN结技术的硅基太阳能电池突显出成本高、效率低、对环境污染严重等问题. 各种新概念及其技术的引入成为解决上述问题的途径, 构成了第三代太阳能电池的雏形. 其中异质结及其技术就是解决上述问题的关键技术, 成为硅基太阳能电池最重要的发展方向之一, 也是实现第三代太阳能电池构想^[6]的支撑技术之一.

异质结具有如下优点: (1) 有利于宽谱带吸收, 从而提高效率. 晶体硅同质结太阳能电池只能吸收

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60676001, 60706023)、国家重点基础研究发展计划(批准号: 2009CB939703)、中国科学院所长基金(批准号: YZ0635)资助项目

2009-01-02 收到

[†] 通讯联系人. Email: jiarui@ime.ac.cn

波长范围在 $0.3 \mu\text{m}$ 至 $1.1 \mu\text{m}$ 范围内的太阳光,该波长范围的能量占总太阳光能量的 46%;而对于占 5% 的紫外区和占 49% 的红外区太阳能无法吸收或转化为热^[7]. 然而,通过与晶体硅禁带宽度不同的材料构成异质结太阳能电池,可展览对太阳光的吸收谱,从而实现宽谱带吸收目的;(2)增加内建电场,提高注入效率^[8]. 与同质结相比,异质结具有更大的内建电场,使注入结两侧的非平衡少数子电流增加,从而增加开路电压和短路电流;(3)减小原料硅消耗,降低成本. 异质结的发展使薄膜技术应运而生,从而能够将电池生长在低成本的玻璃、陶瓷甚至柔性衬底上.

本文旨在综述当今世界第三代太阳能电池领域中异质结及其技术的应用;重点论述异质结及其技术在晶体硅、薄膜硅及新结构太阳能电池中的应用研究现状和研究热点;讨论其与第一、二代太阳能电池融合中的发展动态.

2 异质结及其技术在晶体硅太阳能电池中的应用

2.1 概述

晶体硅同质结太阳能电池发展最早,应用最为成熟. 然而目前,异质结技术及薄膜技术的引入成为该领域的发展趋势. 这类电池的结构特点是:采用禁带宽度不同于晶体硅的薄膜材料,如非晶硅、非晶碳化硅、纳米晶硅和微晶氧化硅等,与晶体硅衬底构成异质结. 通过引入异质结,进一步提高这类电池的能量转化效率,从而解决长期困扰晶体硅太阳能电池的高成本问题. 在工艺方面,这类电池均采用减薄的掺杂晶体硅衬底. 通过化学气相沉积或物理沉积等方法制备出高质量的薄膜材料,与晶体硅衬底构成有源区. 这成为该类电池的基本技术特点. 将异质结应用在晶体硅太阳能电池中,能有效地增加对不能被晶体硅材料吸收波段的太阳光的吸收,从而提高晶体硅太阳能电池的转换效率. 然而,异质结在晶体硅太阳能电池中的应用依然存在着诸如界面缺陷、薄膜材料的稳定性以及与传统工艺的兼容性等方面的问题.

2.2 非晶硅薄膜/晶体硅异质结(HIT 技术)

HIT(hetero-junction intrinsic thin-layer)异质结本征薄膜太阳能电池由日本 SANYO® 公司的 Makoto Tanaka 和 Mikio Taguchi 等人于 1992 年

首次制备成功^[2]. 当时的能量转换效率已达到 18.1%. 此后,该研究工作一直被 SANYO® 公司的研究小组推进^[9-12]. 根据最新报道:2008 年 11 月, HIT 太阳能电池的实验室转换效率已增长至 22.3%,且预期在 2010 年达到 23%^[13]. 它成为异质结与晶体硅太阳能电池的重要结合点,是该领域的热点研究方向.

如图 1 所示,异质结本征薄膜太阳能电池在 N 型晶体硅衬底上生长出厚度约为 10 nm 的 P 型非晶硅薄膜;为了降低电池的反向漏电流,又在中间夹入一层本征的非晶硅薄层,形成了异质结本征薄膜(HIT)太阳能电池结构. 该结构具有以下两个特点:(1)有源区是由禁带宽度不同的非晶硅薄膜和晶体硅构成的异质结. 提高了内建电场,增大了开路电压和短路电流.(2)采用禁带宽度大于晶体硅的非晶硅薄膜($E_g = 1.7\text{eV}$)作为光吸收层,增加了对能量较高的短波长太阳光的吸收,提高了转换效率.

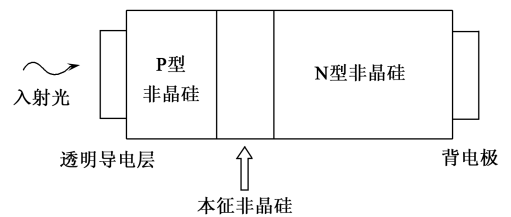


图 1 HIT 太阳能电池结构图

这一技术的特点是:异质结界面决定了 HIT 太阳能电池最终的特性. 为此,SANYO® 公司采取了特殊的工艺以保证获得低缺陷的“完美”界面:(1)出于对异质结界面热损伤的考虑,整个工艺步骤的温度始终小于 200°C . 这成为 HIT 太阳能电池最大的特点.(2)引入本征非晶硅中间层,以钝化由于杂质引入的界面缺陷.(3)采用等离子体化学气相沉积(plasma enhanced chemical vapor deposition)生长非晶硅薄膜,降低了等离子体损伤,获得了高质量的非晶硅薄层. 此外,HIT 的工艺改进几乎全部围绕着制备低界面态展开,它能够有效地降低复合几率,提高非平衡载流子的寿命,最终改善电池的特性. 目前商品化的 HIT Power205 组件的转换效率可达 17.7%,较高的开路电压使得在环境温度升高时,HIT 太阳能电池比单晶硅电池多产生 10% 的电能^[14].

目前,除 SANYO® 公司外,美国德拉威尔大学可再生能源研究小组的 U. K. Das 等人^[15]也在开展对 HIT 太阳能电池的研究. 他们采用本征氢化非晶硅薄膜钝化晶体硅表面,通过光波导衰减法测试

氢稀释率对少子寿命以及开路电压、填充因子等的影响,从而证明了非晶硅层中氢含量会在一定程度上影响 HIT 太阳能电池的转换效率.通过优化设计得到的太阳能电池的转换效率为 18.4%.

由此可见,非晶硅薄膜/晶体硅异质结能够很好地提高晶体硅太阳能电池的转换效率,增强短波长太阳光的吸收特性.然而,它依然处在发展不成熟阶段,存在某些问题:(1)由于非晶硅本身具有的光致衰减效应^[15](Stabler-Wronski effect),造成 HIT 特性先期衰减和不稳定;(2)额外增加了等离子体化学气相沉积非晶硅工艺,使成本增加;(3)由于杂质的扩散,厚度在几个纳米的本征非晶硅层在实际中很难获得,因此反向漏电抑制效果不明显;(4)由于 HIT 要求低温工艺,不能采取传统的后续高温封装工艺,造成工艺不兼容.

2.3 非晶碳化硅薄膜/晶体硅异质结

利用禁带宽度更大的薄膜材料作为光吸收层,通过吸收短波长区的太阳光提高电池的内量子效率,这种新结构被证明能够有效地提高晶体硅转换效率,成为发展的另一趋势.碳化硅薄膜/晶体硅异质结太阳能电池正是基于这一想法提出的.

澳大利亚新南威尔士大学先进光伏研究中心 Dengyuan Song 等^[16]于 2007 年在其发表的论文中提出了嵌有硅纳米晶的碳化硅薄膜/晶体硅异质结太阳能电池的新结构.如图 2 所示,在 N 型晶体硅衬底上生长 P 型碳化硅薄膜构成异质结,其中 P 型的碳化硅层是化学组分依次变化的碳化硅组成的超晶格结构,实现禁带宽度从宽到窄变化.覆盖短波长区(300 nm 至 450 nm),增加了对短波长太阳光的吸收.由于量子限制效应^[17],硅纳米晶的禁带宽度大于体硅的禁带宽度,它的嵌入进一步增加了对短波长太阳光的吸收.另外,通过调节碳化硅的组分,使嵌入其中的硅纳米晶的直径改变,能够有效地调制其光学禁带宽度,展宽光吸收谱.

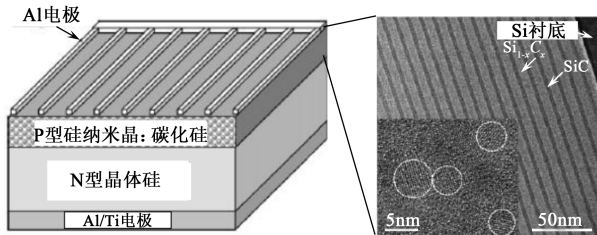


图 2 非晶碳化硅薄膜/晶体硅异质结太阳能电池结构图

他们采用射频磁控溅射硅靶材和掺有 P 型杂质、比例精确控制的碳化硅靶材,形成多层薄膜;然后在氮气中高温退火,使硅纳米晶形成,并且钝化缺

陷.如图 3 所示,在波长 400 nm 处,碳化硅薄膜/晶体硅异质结太阳能电池的内部量子效率达到 35%,远高于晶体硅同质结^[18].

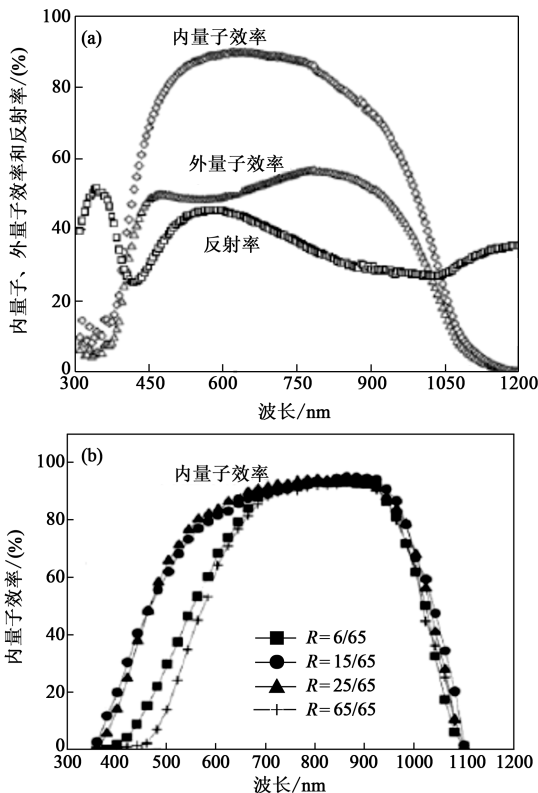


图 3 量子效率谱图:(a) 碳化硅薄膜/晶体硅异质结结构;(b) 晶体硅同质结结构

将碳化硅薄膜应用于太阳能电池领域,形成薄膜异质结新结构,结合硅纳米晶,拓宽了太阳光的吸收谱,这就成为探索提高晶体硅太阳能电池转换效率的新途径.然而,此法尚存在以下问题:(1)高温退火工艺($T=1100^{\circ}\text{C}$)使晶体硅衬底的杂质向碳化硅层扩散,造成异质结界面与杂质界面分离,使电学特性恶化;(2)由于在高温下,两种材料的热应力不同,使异质结界面处出现缺陷,形成复合中心,增大对光生载流子的复合,造成量子效率降低,开路电压减小;(3)碳在硅中极易形成深能级的复合中心,降低光生载流子的寿命,影响电池的转换效率.

2.4 硅纳米晶薄膜/晶体硅异质结

量子限制效应指出,随着纳米晶尺寸的减小,其光学禁带宽度会逐渐增加.纳米晶薄膜/晶体硅异质结太阳能电池利用纳米晶的宽光学能带,增加对不能被晶体硅吸收的短波长太阳光的吸收;通过改变纳米晶的尺寸,设计吸收不同波长的太阳光.

2005 年,新加坡南洋理工大学的 L. Ding 等研究了在二氧化硅层中的硅量子点的光学性质^[19,20].

同年, Martin A. Green 小组就将其引入太阳能电池领域, 并开展基于硅量子点的太阳能电池的研究工作^[21]. 2008 年, 他们首次提出了“Hetero-face SolarCells”的概念^[22], 并成功地制备了硅纳米晶/晶体硅异质界面太阳能电池.

他们通过调节纳米晶的尺寸, 吸收不同波长的太阳光; 用 N 型硅纳米晶作为发射极与 P 型晶体硅构成异质界面太阳能电池. 在 P 型单晶硅衬底上, 利用共溅射硅、氧化硅和磷的氧化物三靶源, 形成 N 型掺杂的硅混晶层, 然后在 1000℃ 的氮气中退火 1 小时, 形成硅纳米晶/晶体硅异质界面. 实验表明, 硅纳米晶越小, 量子限制效应越显著, 对太阳光的吸收谱蓝移. 直径 2—3nm 的硅纳米晶/晶体硅异质结太阳能电池的能量转化效率达 10.58%. 由于硅纳米晶是嵌入在导电性差的氧化硅层中, 影响了电池的电学特性, 导致其能量转化效率降低. 通过改善制备手段和材料, 有望进一步提高这种新结构太阳能电池的转化效率.

2.5 微晶氧化硅薄膜/晶体硅异质结

2008 年, 日本东京工业研究所的 Chandan Banerjee 等提出了用氢化微晶氧化硅薄膜(光学禁带宽度为 2.3eV)与晶体硅构成异质结太阳能电池^[23], 希望替代 SANYO® 公司 HIT 电池采用的非晶硅薄层发射极材料, 首次探索了微晶氧化硅薄膜 HIT 结构太阳能电池的创新思路.

值得关注的是, 与 HIT 太阳能电池不同, 他们选用在晶体硅太阳能电池中被普遍采用的 P 型衬底. 这一点较 HIT 电池更有成本优势. 通过甚高频(60MHz)等离子体化学气相沉积制备 N 型的氢化微晶氧化硅膜, 形成类似 HIT 结构的异质结. 整个电池的制备过程始终在 170℃ 以下完成. 有趣的是, 他们也采用 4 nm 的本征非晶硅薄层作为中间层, 这与 SANYO® 公司的 HIT 电池如出一辙. 从最终电池的测试结果看, 有本征层的开路电压比没有本征层的开路电压高出 60mV, 能量转化效率高出 2.3%, 达到 15.32%. 可见本征非晶硅层的确起到了晶体硅表面钝化和降低异质结界面态密度的作用, 成为继 HIT 电池之后的又一晶体硅异质结新结构.

3 异质结及其技术在薄膜硅太阳能电池中的应用

3.1 概述

薄膜硅太阳能电池是采用薄膜技术制备整个电

池的有源区的一类新型太阳能电池, 有源区厚度在纳米量级. 由于薄膜硅可通过化学气相沉积的方法生长在“非硅”的低成本衬底上, 如玻璃或陶瓷等, 故与晶体硅太阳能电池相比, 极大地降低了成本. 因此, 薄膜硅太阳能电池受到科研和产业界的格外关注^[24,29]. 按照硅的结晶度不同, 可将其分为三类: 非晶硅薄膜、微晶硅薄膜和介于二者之间的非晶微晶硅太阳能电池. 其中, 微晶硅薄膜又可细分为: 晶粒尺寸在微米量级的微晶硅薄膜和晶粒尺寸更小的纳米晶硅薄膜. 非晶硅薄膜太阳能电池的能量转化效率虽没有晶体硅电池高, 但仍可达到 9.47%^[24].

回顾非晶硅薄膜太阳能电池的研究进展, 异质结及其技术在其中得到了大量的应用. 在研究的早期, 主要集中关注上述三类薄膜硅的同质单结的研究上, 其中对非晶硅薄膜太阳能电池的研究占绝大部分. 为了抑制非晶硅本身带来的“光致衰减效应”^[15], 研究的热点转向非晶硅、微晶硅、多晶硅以及非晶锗化硅构成的同质叠层结构(tandem structure)^[25—27]. 采用禁带宽度大、导电性好的材料作为“窗口层”^[28], 与非晶硅薄层构成异质结, 这成为目前异质结与薄膜硅太阳能电池又一突出的结合点. 在此方面, 研究的热点是解决异质结界面由失配所带来的界面态密度高和光生载流子复合率大的问题. 一旦问题得以解决, 异质结与薄膜太阳能电池的结合将成为较活跃的研究方向^[29,30].

3.2 硅基叠层薄膜异质结

叠层结构是第二代薄膜硅基太阳能电池中研究最为广泛的领域. 这类电池包括非晶硅/非晶锗化硅叠层、非晶硅/微晶硅叠层以及非晶硅/多晶硅叠层三类. 其特点是采用“堆叠”的结构, 将上述材料的同质单结(即相同材料的 P—N 结)自上而下“串联”起来, 构成电池, 最终的效率是每层电池的叠加. 为了更全面地吸收各波长的太阳光, 顶层通常采用禁带宽度相对较大的非晶硅材料, 底层采用禁带宽度较小的非晶锗化硅、微晶硅或多晶硅材料构成叠层. 在制备工艺上, 采用射频(13.56MHz)或甚高频(60MHz)等离子体化学气相沉积的方法, 连续生长各叠层材料.

SANYO® 公司的 Okamoto 等^[25]成功地制备出了面积为 1200cm² 的非晶硅/非晶锗化硅叠层电池组件, 稳定效率达到 9.2%. 这类电池面临的问题是如何制备出特性稳定的、禁带宽度小于 1.5eV 的非晶锗化硅层. Shah 等^[26]采用微晶硅材料代替非晶锗化硅材料解决了上述问题, 制备了非晶硅

(1.8eV)/微晶硅(1.1eV)叠层电池,并开展了大量的研究和理论分析工作.此外,van Veen 等^[27]采用 Hot-wire CVD 法制备了非晶硅/多晶硅叠层电池,其转化效率达到 8.1%.

3.3 非晶碳化硅薄膜/非晶硅薄膜异质结

2008 年,日本东京工业研究所的 Myong 等采用非晶碳化硅作为“窗口层”与下面的非晶硅构成异质结,采取加入中间缓冲层及优化本征非晶硅层的方案,较好地解决了异质界面问题^[29].通过优化,其能量转换效率达 9.86%,超过了非晶硅薄膜同质结太阳能能量转化效率记录,追平了非晶硅/微晶硅叠层太阳能电池的转化效率^[28].

通过低温($T < 200^{\circ}\text{C}$)甚高频等离子体化学气相沉积的方法在绒面玻璃衬底上依次生长:N 型非晶硅层(20nm)/本征氢化非晶硅层(320—480 nm)/缓冲层/P 型非晶碳化硅窗口层(12 nm),构成 P-I-N 异质结有源区.为了降低 P 型和本征异质结界面的复合,改善异质结界面,该研究组选择了三种不同的缓冲层方案,最终通过电池的 $I-V$ 特性对比,证明采用 P 型高氢稀释率的非晶碳化硅膜作为中间缓冲层电池的效率高,达到 9.86%(如图 4 所示).此外,从最终电池特性和量子效率的角度,研究了氢稀释率和硅烷浓度对本征氢化非晶硅层的影响,从而更好地改善了异质结特性.为了尽可能减少非晶硅带来的光致衰减效应,他们还探索了采用本征微晶硅层作为光吸收层的方案,结果表明,电池的光致衰减效应最低,约为 10%.

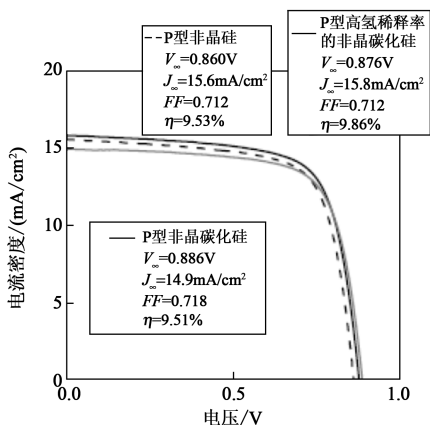


图 4 三种不同异质结界面缓冲层的电池 $J-V$ 特性

3.4 纳米晶硅薄膜/非晶硅薄膜异质结

2008 年,英国萨里大学的研究小组提出了用准分子激光使非晶硅再结晶方式制备纳米晶硅/非晶硅薄膜异质结太阳能电池^[30],引入纳米晶以期解决非

晶硅的光致衰减效应.其能带结构如图 5 所示.制备过程如下:在玻璃衬底上依次沉积非晶碳化硅窗口层

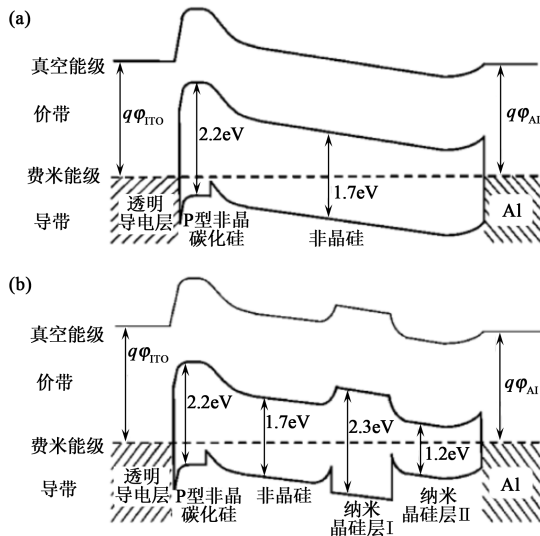


图 5 能带结构图 (a) 无硅纳米晶层; (b) 硅纳米晶/非晶硅薄膜异质结

和本征非晶硅层,然后通过准分子激光器加热非晶硅再结晶的方式形成纳米晶硅薄层,与非晶硅构成异质结.

通过 $I-V$ 测试发现:随着硅纳米晶数量的增加(晶化率提高),异质结薄膜电池的转换效率及开路电压和短路电流均有所下降.经过进一步验证得到,由激光造成的热效应影响了本征非晶硅/P 型非晶碳化硅界面,使开路电压减小;而短路电流的恶化则是由纳米晶硅/非晶硅异质结界面的复合增加引起的.由此可见,异质结界面决定了新型异质结薄膜太阳能电池的转换效率和特性;如何改善异质结界面减小复合成为研究的热点.

4 异质结及其技术在新结构太阳能电池中的应用

4.1 概述

当今,将新概念、新结构及其技术(如纳米技术、上下转换技术、表面等离子体技术等)应用到新型太阳能电池中,已成为新的发展方向,产生了第三代太阳能电池的雏形.其中同样不乏异质结技术的应用.异质结技术和纳米技术的结合成为这类新型电池的结构特点.在此结构中,纳米棒阵列被广泛采用,它能够有效地减少光生载流子的传输距离,提高收集效率.另外,其本身可以增加光吸收,减小光反射率,

从而提高电池的转换效率. 然而, 这类电池还处在研究阶段, 纳米结构的引入所带来的成本增加和可靠性问题仍待解决.

4.2 非晶硅薄膜/晶硅纳米线异质结

美国宾夕法尼亚大学的 Joan Redwing 等^[31]采用新结构将非晶硅薄膜包裹在竖直分布的高深宽比的硅纳米棒上, 形成非晶硅薄膜/晶硅纳米棒异质结, 如图 6 所示, 以期通过纳米结构提高与太阳光接触的面积, 提高能量转换效率, 从而将异质结技术、纳米技术和薄膜太阳能技术融为一体. 到 2010 年, 其转化效率有望达到 15%.

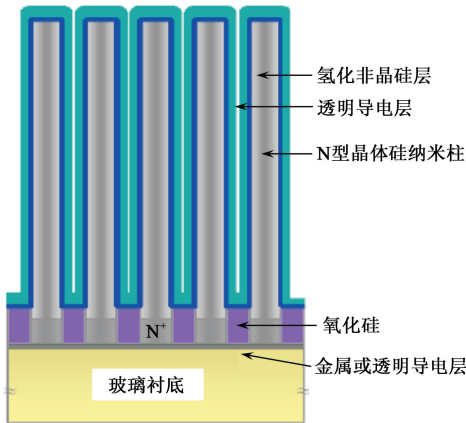


图 6 非晶硅/晶硅纳米线异质结太阳能电池结构图(图中 N^+ 为 N 型重掺杂)

4.3 非晶硅薄膜/碳纳米管异质结

美国 Solasta 公司的 Michael Naughton 等^[32]将非晶硅薄膜沉积在碳纳米管阵列的表面, 制备出纳米结构的非晶硅薄膜/碳纳米管异质结太阳能电池(如图 7 所示), 彻底隔开了光子的传输路径与光生载流子的传输路径, 有望提高转换效率. 预期到 2010 年, 这类电池的效率可达到 25%.

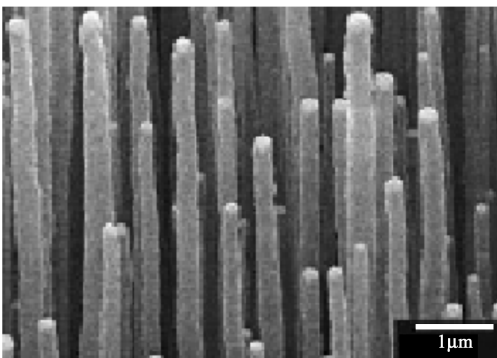


图 7 非晶硅/碳纳米管异质结新结构太阳能电池

5 结束语

综上所述, 异质结及其技术在新型硅基太阳能电池领域被广泛应用, 成为研究的热点. 将异质结应用到晶体硅和薄膜硅太阳能电池中, 能有效地增加不能被硅材料吸收波段的太阳光的吸收, 提高硅基太阳能电池的转换效率. 然而, 由于异质结的引入带来的晶体硅电池的性能稳定性、工艺兼容性问题, 以及薄膜硅电池的异质结界面问题仍有待解决, 进一步的工艺改进和新材料、新结构的剪切与设计成为可能的解决方案, 从而推动异质结及其技术与新型硅基太阳能电池更广泛的融合, 并最终实现产业化.

参考文献

- [1] Gubanov A I *et al.* Zh. Tekh. Fiz., 1951, 21: 304
- [2] Tanaka M *et al.* Japanese Journal of Applied Physics, 1992, 31: 3518
- [3] 江泽民. 上海交通大学学报, 2008, 43(3): 0345 [Jiang Z M. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 43(3): 0345 (in Chinese)]
- [4] Chapin D M *et al.* Japanese Journal of Applied Physics, 1954, 21: 676
- [5] Green M. Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 2002, 14: 65
- [6] Green M A. Recent Developments and Future Prospects for Third Generation and Other Advanced Cells. In: Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Hawaii, 2006. 15
- [7] http://sqa1.org/wiki/Solar_Radiation
- [8] Sze S. M. Physics of Semiconductor Devices, Second Edition. New York: John Wiley & Sons, 1981. 122
- [9] Taguchi M, Kawamoto K, Tsuge S. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2000, 8(5): 503
- [10] Tanaka M *et al.* Development of HIT solar cells with more than 21% conversion efficiency and commercialization of highest performance HIT modules. In: Proceedings of 3rd World Conference on the Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, 2003, 955
- [11] Taguchi M, Sakata H, Yoshimine Y *et al.* An approach for the higher efficiency in the HIT cells. In: Proceedings of the Thirty — first IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Coronado, 2005. 866
- [12] Taguchi M, Terakawa A *et al.* Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2005, 13 (6): 481
- [13] Tsunomura Y, Yoshimine Y, Taguchi M *et al.* Solar Energy Materials and Solar Cells, 2008, In Press
- [14] Data from SANYO HIT® Power 205 Photovoltaic Module

- [15] Staebler D L, Wronski C R. *Applied Physics Letters*, 1977, 31 (4): 292
- [16] Song D *et al.* *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2008, 92 (4): 474
- [17] Wright Paul. *Computational Part III Project*. Cambridge: Cambridge Press, 2000
- [18] Santana G *et al.* *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2000, 60: 135
- [19] Ding L *et al.* *Phys. Rev. B*, 2005, 72: 125419
- [20] Wang X X, Ding L *et al.* *Phys. Rev. B*, 2005, 72: 195313
- [21] Green M A *et al.* All-silicon tandem cells based on “artificial” semiconductor synthesised using silicon quantum dots in a dielectric matrix. In: *Proceedings of the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Barcelona, 2005*, 3
- [22] Park S *et al.* *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2009, 93:684
- [23] Banerjee C, Sritharathikhun J *et al.* *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2008, 41: 185107
- [24] Meier J, Spitznagel J, Kroll U *et al.* *Thin Solid Films*, 2004, 451–452: 518
- [25] Okamoto S, Maruyama E, Terakawa A *et al.* *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2001, 66: 85
- [26] Shah A V *et al.* *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2003, 78: 469
- [27] van Veen M K *et al.* *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2002, 299–302: 1194
- [28] Paulson P D *et al.* *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2004, 12: 69
- [29] Myong S Y *et al.* *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2008, 92: 639
- [30] Adikaari A A D T *et al.* *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2008, 92: 634
- [31] Redwing J *et al.* *DOE Solar Energy Technologies Program*, 2007
- [32] Naughton M *et al.* *DOE Solar Energy Technologies Program*, 2007