

doi: 10.3788/gzxb20134201.0013

一种印刷型薄膜太阳能电池 p-n 结调制技术

朱子诚, 王伟, 蒋辰, 周芳芳

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院 教育部光学仪器与系统工程研究中心,
上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093)

摘 要:能带值为 0.5~0.85 eV 材料的稀缺是多结太阳能电池面临的一个主要挑战, 本文使用非真空的机械化学法合成了能带值为 0.83 eV 的 Cu_2SnS_3 化合物, 使用印刷技术将其制备成吸收层薄膜, 并采用 superstrate 太阳能电池结构 ($\text{Mo}/\text{Cu}_2\text{SnS}_3/\text{In}_2\text{S}_3/\text{TiO}_2/\text{FTO glass}$) 对其光伏特性进行了研究. 实验表明所制备的太阳能电池短路电流密度、开路电压、填充因子和转换效率分别为 12.38 mA/cm^2 、320 mV、0.28 和 1.10%. 此外, 为更好地满足多结太阳能电池对电流匹配的需求, 本文对所制备太阳能电池的 $\text{Cu}_2\text{SnS}_3/\text{In}_2\text{S}_3$ p-n 结进行了分析. 通过在 p-n 结界面植入一层薄的疏松缓冲层, 使调制后的太阳能电池短路电流密度从最初的 12.38 mA/cm^2 增加到了 23.15 mA/cm^2 , 相应太阳能电池转换效率从 1.1% 增加到了 1.92%. 该 p-n 调制技术对印刷型薄膜太阳能电池具有重要借鉴意义.

关键词: Cu_2SnS_3 薄膜太阳能电池; 非真空印刷法; $\text{In}_2\text{S}_3/\text{Cu}_2\text{SnS}_3$ p-n 结调制技术

中图分类号: O649

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)01-0013-6

A p-n Junction Modulation Technique for Printed Thin Film Solar Cell

ZHU Zi-cheng, WANG Wei, JIANG Chen, ZHOU Fang-fang

(Engineering Research Center of Optical Instrument and System (Ministry of Education), Shanghai Key Lab of Modern Optical System, School of Optics-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The scarcity of materials with band gap value of 0.5~0.85 eV is one of the major challenges for the multi-junction solar cells. In this study, the compounds Cu_2SnS_3 with band gap of 0.83 eV is synthesized by non-vacuum mechanochemical method, and is prepared into absorber layer by non-vacuum printing technique. The photovoltaic properties of the Cu_2SnS_3 are studied by employing a superstrate solar cell structure of $\text{Mo}/\text{Cu}_2\text{SnS}_3/\text{In}_2\text{S}_3/\text{TiO}_2/\text{FTO glass}$. Experiment result indicates that the short-circuit current density, open-circuit voltage, fill factor and conversion efficiency of the fabricated solar cell are 12.38 mA/cm^2 , 320 mV, 0.28% and 1.10%, respectively. Furthermore, to better meet the requirements of multi-junction solar cell on the current matching, the $\text{Cu}_2\text{SnS}_3/\text{In}_2\text{S}_3$ p-n junction of the fabricated solar cell is analyzed. A p-n modulation technique with a thin porous buffer layer inserted into the p-n junction interface is proposed. The results indicate that the technique can promote the short-circuit current density of the solar cell from initial 12.38 mA/cm^2 to 23.15 mA/cm^2 , and the corresponding solar cell conversion efficiency from 1.1% to 1.92%. This p-n modulation technique can be an important reference to the printed thin film solar cells.

Key words: Cu_2SnS_3 thin film solar cell; Non-vacuum printing technology; $\text{In}_2\text{S}_3/\text{Cu}_2\text{SnS}_3$ p-n junction modulation technique

0 引言

多结太阳能电池具有一系列优化的能带组合,

可将入射的太阳能光谱分成其各能带对应的一个个小的光谱带, 进而最大效率地利用入射的太阳能光谱^[1-4]. 因而, 多结太阳能电池的转换效率可超越单

基金项目: 上海市科委科技基金(No. 10540500700)和上海市重点学科第三期(No. S30502)资助

第一作者: 朱子诚(1988-), 男, 汉族, 硕士研究生, 主要研究方向为印刷型薄膜太阳能电池. Email: ascecheng33@gmail.com.

收稿日期: 2012-05-31; 录用日期: 2012-09-10

结太阳能电池的限制(31%),达到非聚焦条件下的焦3或4结太阳能电池自上而下最优的能带组合为(2.3 eV/1.4 eV/0.8 eV)或(2.6 eV/1.8 eV/1.2 eV/0.8 eV),2结聚焦太阳能电池则为(1.7 eV/0.8 eV).因此能带值为0.8 eV的半导体材料对多结太阳能电池具有重要的应用价值.但现实中这样的半导体材料却很少见,对其光伏特性研究的报道更为稀少.

薄膜材料因具有吸收率高、能带值可调谐及制备成本低等特点已成为最有潜力的多结太阳能电池材料之一^[7-11]. 穆硫锡铜矿(Cu_2SnS_3 , CTS)是一种组成元素丰富且毒性极低的化合物薄膜材料,文献^[12-14]报道了CTS格栅参量可与 $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}(\text{S}, \text{Se})_2$ 、 $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ 等潜在的高效率低成本多结薄膜太阳能电池吸收层材料进行很好地匹配.因此,CTS具有重要的潜在应用价值,对其光伏特性的研究就显得非常必要.当前,科学家们已对CTS薄膜材料的晶体结构、能带、电学及光学等特性进行了研究^[15-17],但无法直接体现CTS材料的光伏特性.所以,有必要将CTS薄膜制备成太阳能电池,进而对其光伏特性进行直观、深入地了解.此外,多结太阳能电池的总电流密度取决于各子电池产生的最小短路电流密度.据理论分析^[5],高效2,3和4结太阳能电池底部子电池所需的短路电流密度分别为41、34和24 mA/cm^2 ,即对于多结太阳能电池的底部电池,短路电流密度须高于20 mA/cm^2 才有可能获得高效的薄膜太阳能电池.

本文使用非真空机械化学法合成CTS化合物,使用印刷法制备CTS吸收层薄膜,采用自行研制的

68%和聚焦条件下的86%^[5-6].据理论计算^[5],非聚superstrate太阳能电池结构($\text{Mo}/\text{CTS}/\text{In}_2\text{S}_3/\text{TiO}_2/\text{FTO glass}$)^[18]将其制备成太阳能电池进而对其光伏特性进行直观、深入研究.此外,为更好地满足多结太阳能电池对电流匹配的需求,提出了在太阳能电池CTS/ In_2S_3 p-n结之间植入一薄的疏松 In_2S_3 缓冲层,以改善印刷型太阳能电池的p-n结特性.实验研究了该p-n结调制技术对太阳能电池短路电流密度的影响规律.

1 实验部分

1.1 材料和试剂

铜粉(Cu,纯度99.9%),乙酰丙酮溶液(Acetylacetone,纯度99.5%)和四氯化钛溶液(TiCl_4)购自Wako Pure Chemical Industries Ltd.;锡粉(Sn,纯度99.5%)购自Sigma-Aldrich;四异丙醇钛溶液(Titanium(IV)isopropoxide,纯度99%),硫粉(S,纯度99.9%)和硫脲粉末(Thiourea)购自Kishida Chemical Co. Ltd.;氯化铟粉末(InCl_3 ,无水,纯度98%)购自Tokyo Chemical Industry Co. Ltd.;丙二醇(propylene glycol)购自Kando chemicals Co. Ltd.

1.2 实验方法

1.2.1 CTS化合物的合成

铜、锡和硫粉末按摩尔比2:1:3混合,再将混合粉末与研磨球按比重1:20混合并装入机械化学仪(M2-3F, Gokin)进行不同速度的研磨以获得完全反应的产物(图1最左端示意图).实验表明当研磨条件为(800 rpm, 1h)时可获得单相CTS粉末.

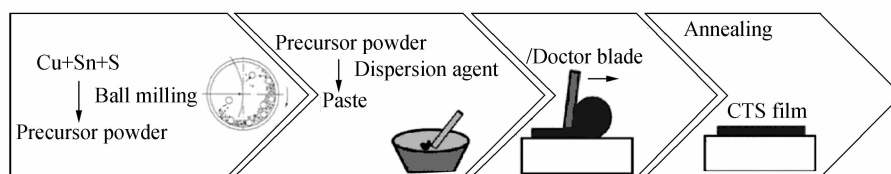


图1 刮刀法制备CTS薄膜流程图

Fig. 1 Doctor blade process for the preparation of CTS absorber layer

1.2.2 CTS薄膜太阳能电池的制备

使用印刷法将合成的CTS粉末制备成吸收层薄膜,采用superstrate太阳能电池结构($\text{Mo}/\text{CTS}/\text{In}_2\text{S}_3/\text{TiO}_2/\text{FTO glass}$,其结构见图2)对其光伏特性进行研究.各膜层制备方法如下:

致密 TiO_2 窗口层^[19]与 In_2S_3 缓冲层^[20]的制备.1)对FTO glass表面进行清洗,经干燥后使用光子表面处理仪去除玻璃表面的有机残留物;2)将titanium isopropoxide和acetylacetone按摩尔比1:2配制成混合溶液(记为TAA),使用酒精将制得

的TAA溶液按体积比1:10进行稀释,实验使用50 ml溶液进行致密 TiO_2 窗口层的制备(喷涂时控制FTO玻璃表面的温度约为450℃).将沉淀得到的致密 TiO_2 窗口层放置在40 mM TiCl_4 溶液中进行薄膜表面处理(70℃, 30 min);3)配制0.01 M InCl_3 和0.06 M Thiourea溶液(配置富硫溶液制备富硫 In_2S_3 缓冲层,以帮助吸收层晶体在退火过程中的生长),实验使用50 mL溶液进行 In_2S_3 缓冲层的制备(喷涂时控制基底表面温度在200℃左右).实验制备得到的致密 TiO_2 窗口层和 In_2S_3 缓冲层

厚度分别约为 100 和 300 nm.

CTS 印刷浆的制备. 如图 1 所示:1)将 0.2 g CTS 粉末放入研磨碗进行 5 min 的研磨;2)将 1 ml 10wt% Thiourea 溶液缓慢加入研磨碗并进行 10 min 的研磨;3)将 2 ml propylene glycol 缓慢加入研磨碗并研磨 10 min. 为获得合适粘度的印刷浆,试验中允许各研磨时间做细微调整.

CTS 薄膜的沉淀. 使用刮刀法将配置好的 CTS 印刷浆沉淀到 $\text{In}_2\text{S}_3/\text{TiO}_2/\text{FTO glass}$ 基板上(如图 1 所示). 将印刷得到的基板放置在电热炉上进行干燥(温度 125℃,干燥时间 5 min). 干燥后的样品被放置在氮气氛围的退火炉中进行快速温度退火处理.

Mo 电极的沉淀. 使用溅射法将 Mo 电极沉淀到退火后的 $\text{CTS}/\text{In}_2\text{S}_3/\text{TiO}_2/\text{FTO glass}$ 基板上以完成太阳能电池的制备 ($\text{Mo}/\text{CTS}/\text{In}_2\text{S}_3/\text{TiO}_2/\text{FTO glass}$). 太阳能电池有效面积为 $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$.

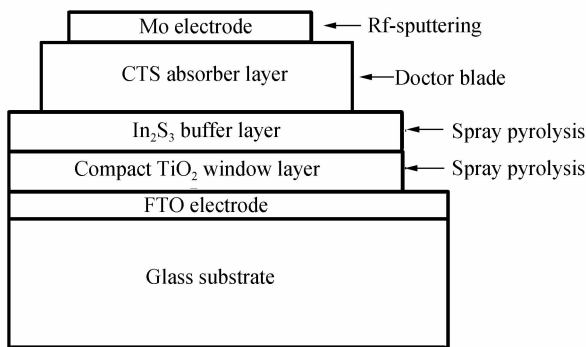


图 2 所使用的太阳能电池结构示意图

Fig. 2 Structure of the solar cell

1. 2. 3 表征方法

对经退火的 CTS 吸收层薄膜进行表征:使用 X 射线衍射仪(X-ray Diffraction, XRD, MiniFlex II, Rigaku)分析样品的结晶度和晶相;借助扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM, JSM-6510, JEOL)观察样品的形态;利用紫外可见光谱仪(UV/vis spectrophotometer, UV/vis, Lambda 750, PerkinElmer)研究样品的光学特性;在标准测试平台上(AM 1.5 太阳光模拟器, 100 mW/cm^2 , YSS-100A, Yamashita Denso, Japan),使用短路电流-开路电压法(short-circuit current density vs open-circuit voltage, J - V)对制备完成的太阳能电池进行光电特性的表征.

2 结果与讨论

2.1 CTS 薄膜太阳能电池光伏特性

实验对 CTS 吸收层退火温度和退火时间进行了优化^[18],发现在(400℃, 30 min)条件下得到的晶

体结晶度及光学特性较好. 图 3 中的插图(a)为优化退火条件下得到的 CTS 吸收层 X 射线衍射图. 观察图片可知,样品各衍射峰位置从左到右依次为 28.4、31.7、47.3 和 56.1 度,从 PCPDF # 270198 卡片可知这些衍射峰分别对应 CTS (-2, -1, 1)、(-2, -1, 5)、(-2, 0, 10)和(-3, -2, 10). 图 3 中插图(b)为优化退火条件下得到的 CTS 吸收层 UV/vis 吸收光谱曲线图,由吸收截止边带计算得退火后 CTS 能带宽度为 0.83 eV. 为表征优化退火条件下得到的 CTS 吸收层光电转换特性,实验制备了 superstrate 结构的太阳能电池 ($\text{Mo}/\text{CTS}/\text{In}_2\text{S}_3/\text{TiO}_2/\text{FTO glass}$),并在标准 AM 1.5 条件下对其进行了 J - V 特性的测试,结果见图 3. 从图可看出,太阳能电池的短路电流密度、开路电压、填充因子和转换效率分别为 $12.38 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 、320 mV、0.28 和 1.10%.

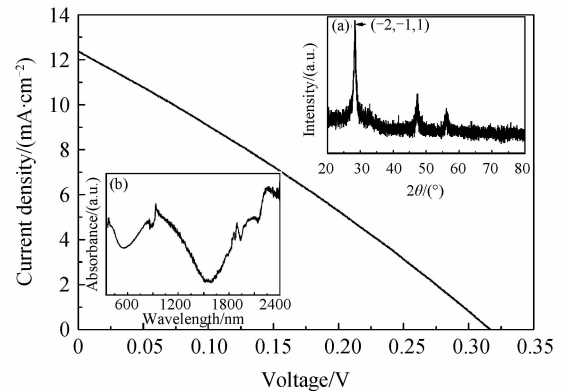


图 3 优化退火条件下得到的 CTS 吸收层光电转换特性
Fig. 3 Conversion efficiency of the CTS absorber layer prepared at the optimal annealing condition

由以上分析可知,经优化条件退火的 CTS 材料能带值为 0.83 eV,其光电转换特性较好,因此很适合作为多结太阳能电池底部子电池用. 然而,根据理论计算,多结太阳能电池底部电池的短路电流密度需超过 $20 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 时才能与多结太阳能电池的上层电池进行很好地电流匹配,进而获得高效多结太阳能电池. 因此有必要进一步提高太阳能电池的短路电流密度.

2.2 一种新颖 p-n 结调制技术

图 4 为优化退火条件下得到的 CTS 吸收层薄膜 SEM 横截面形态图. 观察图可知,实验所制备的太阳能电池吸收层薄膜致密度较好,但其形态仍呈现粉末状. 所以制备得到的 CTS 薄膜太阳能电池 $\text{CTS}/\text{In}_2\text{S}_3$ p-n 结接触面较粗糙,其载流子复合较为严重. 为提高该 CTS 太阳能电池的短路电流密度,使其能更好地满足高效多结太阳能电池对电流匹配的要求,本文提出了一种简单的能增强太阳能

电池短路电流密度的方法. 该方法通过在 CTS 吸收层薄膜和 In_2S_3 缓冲层之间植入一薄的疏松 In_2S_3 层, 然后通过退火的方法使得在 CTS 吸收层薄膜和 In_2S_3 缓冲层之间形成一个掩埋的 p-n 结, 进而提高电池的短路电流密度和光电转换效率.

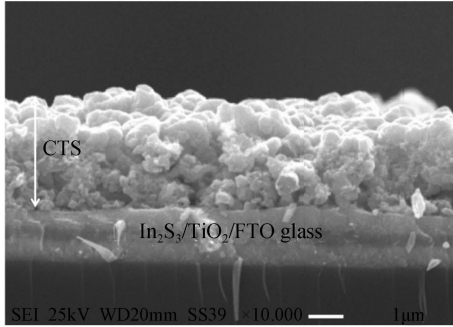


图 4 优化退火条件下得到的 CTS 薄膜 SEM 横截面形态图
Fig. 4 SEM cross-section image of CTS absorber layer annealed at optimal annealing condition

2.2.1 疏松 In_2S_3 层的制备

制备疏松 In_2S_3 层的溶液与沉淀 In_2S_3 缓冲层的溶液相似, 但制备温度从原来的 200°C 下降到了 120°C . 此外, 制备疏松 In_2S_3 层时, 溶液的喷涂速度较制备 In_2S_3 缓冲层时慢很多, 否则已经沉淀的疏松 In_2S_3 层将被后续的喷涂溶液清洗掉. 实验采用改变喷涂溶液的体积量来控制所制备疏松 In_2S_3 层的厚度(如图 5(b)为疏松 In_2S_3 层示意图).

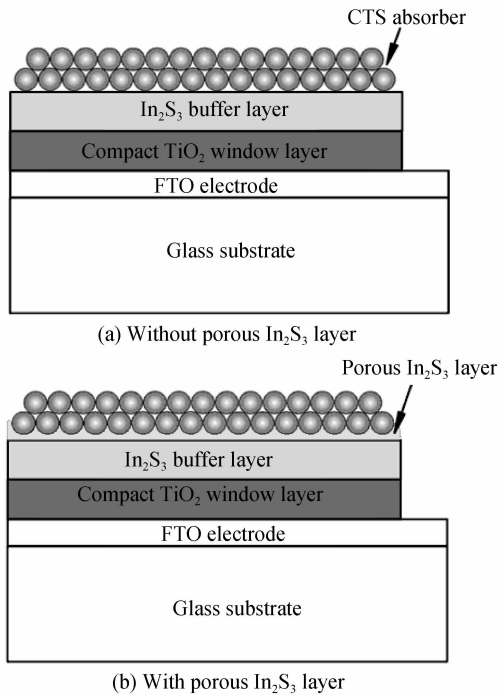


图 5 太阳能电池 CTS/ In_2S_3 p-n 结示意图
Fig. 5 Schematic diagram of CTS/ In_2S_3 p-n junction of the solar cell

2.2.2 掩埋 p-n 结的形成

使用刮刀法在已制备的疏松 In_2S_3 层上沉淀 CTS 印刷浆. 沉淀后的样品被放置一小段时间以使

CTS 印刷浆与疏松 In_2S_3 层进行有效地界面接触. 因 CTS 印刷浆带有粘性, 因此能与疏松 In_2S_3 层进行交叉界面的紧密接触. 这种紧密接触的交叉界面在退火后可形成掩埋 p-n 结^[21-22].

2.2.3 疏松 In_2S_3 层膜厚的优化

实验制备了具有不同厚度疏松 In_2S_3 层的 CTS 太阳能电池, 其 $J-V$ 光电转换特性见图 6(具体电池参量列于表 1). 从图 6 可知, 带有疏松 In_2S_3 层的太阳能电池较没有疏松 In_2S_3 层的太阳能电池的短路电流密度有明显的增加. 增加的短路电流密度主要得益于具有大面积、高电子收集效率掩埋 p-n 结的形成. 除此之外, 具有大面积的掩埋 p-n 结也可更加有效地覆盖 CTS 颗粒, 从而有利于 CTS 颗粒表面钝化, 减少载流子复合, 增加太阳能电池光电转换效率. 从表 1 可以看出, 这些太阳能电池的短路电流密度与疏松 In_2S_3 层的厚度具有明显的依赖关系. 整

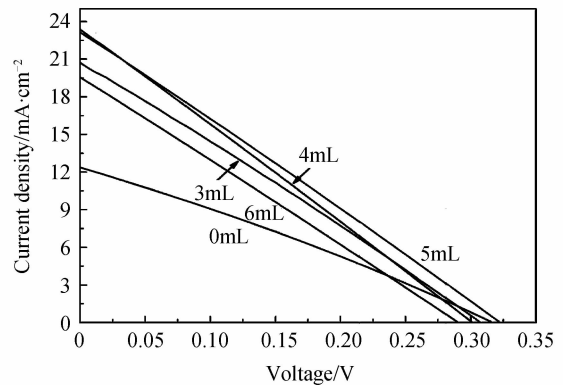


图 6 疏松 In_2S_3 厚度对 CTS 太阳能电池光电转换特性的影响

Fig. 6 Thickness effects (spray volumes) of porous In_2S_3 layer on the photovoltaic properties of the CTS solar cell

体上, 这些太阳能电池的短路电流密度随着疏松 In_2S_3 层厚度的增加而增加, 当疏松 In_2S_3 层的厚度为“4 ml 喷涂溶液”时达到最大值 23.38 mA/cm^2 . 但当疏松 In_2S_3 层的厚度为“5 mL 喷涂溶液”时太阳能电池的短路电流密度开始下降, 继续增加到“6 ml 喷涂溶液”时则从最大的 23.38 mA/cm^2 下降到 19.57 mA/cm^2 . 分析认为这些疏松 In_2S_3 层在退火后其电阻仍然较高, 其电子移动速度较低, 因此当疏松 In_2S_3 层的厚度达到某个值后, 疏松 In_2S_3 层本身的载流子复合成为主导因素, 因此太阳能电池的光电转换效率降低了.

此外, 文献[21]报道了 In_2S_3 与 CIGSe 在高温情况下的界面相互化学反应情况. 表明退火过程中 In_2S_3 中的硫元素扩散到 CIGSe 的表面, 形成了 CIGSSe ; 而 CIGSe 表面的铜元素扩散到了 In_2S_3 薄膜的表面, 形成了 CuIn_5S_8 . 因此, 我们推测, 在本实

验高温退火的过程中,宽能带的 In_2S_3 材料与 CTS 薄膜材料在他们的界面处也可能发生相互的化学反应. 因此 CTS 薄膜在临近 In_2S_3 缓冲层的界面上应该存在能带增宽的现象. 通常,这种存在于 In_2S_3 缓冲层与 CTS 薄膜之间的,能带值大于块状 CTS 薄膜的现象,能够使得价带偏移增加从而减少该异质结的复合,因此太阳能电池的开路电压和短路电流密度都有望得到改善^[23]. 然而从表 1 可知,这些太阳能电池的开路电压都未能得到应有的改善,这可能是由于粉末状的 CTS 吸收层材料,其块体本身的复合非常严重,以至于来自 p-n 结区增加的开路电压都被忽略了,因此太阳能电池的整体开路电压没有得到改善. 为此,要获得高效 CTS 太阳能电池,需优先考虑吸收层薄膜质量的改善.

由表 1 可知,由于疏松 In_2S_3 层的使用,太阳能电池的光电转换效率得到了较大的改善,达到了 1.92%,较没有疏松 In_2S_3 层时提高了约 75%. 太阳能电池的短路电流密度也从最初的 12.38 mA/cm^2 增加到了 23.15 mA/cm^2 .

表 1 由图 6 总结出的太阳能电池参量

Table 1 Solar cell parameters summarized from Fig. 6

Spray volume/mL	$J_{sc}/(\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2})$	V_{oc}/V	FF	Efficiency/(%)
0	12.38	0.32	0.28	1.10
3	20.73	0.31	0.26	1.68
4	23.38	0.30	0.25	1.79
5	23.15	0.32	0.26	1.92
6	19.57	0.29	0.25	1.44

3 结论

本文使用机械化学法合成了 CTS 化合物,发现经退火后的 CTS 材料能带值约为 0.83 eV 且光伏性能优异,具有潜在在非聚焦三、四结和聚焦二结化合物薄膜太阳能电池应用价值. 为更好地满足高效多结太阳能电池对电流匹配的要求,我们提出了一种新颖的借助疏松 In_2S_3 层从而创造掩埋 p-n 结的方法,将 CTS 太阳能电池的短路电流密度从最初的 12.38 mA/cm^2 增加到了 23.15 mA/cm^2 (增加了约 1 倍),相应太阳能电池转换效率从 1.1% 增加到了 1.92% (增加了约 75%). 该 p-n 结调制技术对印刷型薄膜太阳能电池具有重要借鉴价值.

参考文献

[1] GUTER W, SCHONE J, PHILIPPS S P, *et al.* Current-matched triple-junction solar cell reaching 41.1% conversion efficiency under concentrated sunlight[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **94**(22): 223504.
 [2] LI Hui, WANG Tao, LI Bao-xia, *et al.* LP-MOCVD Growth of $\text{GaInP}_2/\text{GaAs}/\text{Ge}$ two-junction series-connected tandem solar cells[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(2): 209-212. 李辉,汪韬,李宝霞,等. $\text{GaInP}_2/\text{GaAs}/\text{Ge}$ 叠层太阳能电池材料

的低压 MOCVD 外延生长[J]. *光子学报*, 2002, **31**(2): 209-212.
 [3] KING R R, LAW D C, EDMONDSON K M, *et al.* 40% efficient metamorphic $\text{GaInP}/\text{GaInAs}/\text{Ge}$ multijunction solar cells[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **90**(18): 183516-1-3.
 [4] XU Qin-feng, YE Qing, QU Rong-hui, *et al.* Influence of thermal effect on multi-junction $\text{GaInP}/\text{GaAs}/\text{Ge}$ concentrating photovoltaic system[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, **8**(4): 354-356.
 [5] SHOCKLEY W, QUEISSER H J J. Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells[J]. *Journal of Applied Physics*, 1961, **32**(3): 510-511.
 [6] VOS A D. Detailed balance limit of the efficiency of tandem solar cells[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1980, **13**(5): 839-846.
 [7] NISHIWAKI S, SIEBENTRITT S, WALK P, *et al.* A stacked chalcopyrite thin-film tandem solar cell with 1.2 V open-circuit voltage[J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2003, **11**(4): 243-248.
 [8] LIU Bao-qi, ZHAO Xiao-peng. Properties of solar cells sensitized by mixed dye of plant[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(2): 184-187. 刘宝琦,赵晓鹏. 混合植物染料敏化的太阳能电池性能[J]. *光子学报*, 2006, **35**(2): 184-187.
 [9] THAMPI K R, GRATZEL M, BREMAUD D, *et al.* Nanocrystalline dye-sensitized solar cell/copper indium gallium selenide thin-film tandem showing greater than 15% conversion efficiency[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **88**(20): 203103.
 [10] KIM J Y, LEE K, COATES N E, *et al.* Efficient tandem polymer solar cells fabricated by all-solution processing[J]. *Science*, 2007, **317**(5835): 222-225.
 [11] LIU Fan-fang, SUN Yun, WANG He, *et al.* Rapid Thermal Annealing on $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ films and solar cells with different content ratios[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(9): 2188-2191.
 [12] FERNANDES P A, SALOME P M P, CUNHA A F Da. A study of ternary Cu_2SnS_3 and Cu_3SnS_4 thin films prepared by sulfurizing stacked metal precursors[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2010, **43**(21): 215403.
 [13] LI B, XIE Y, HUANG J, *et al.* Synthesis, characterization, and properties of nanocrystalline Cu_2SnS_3 [J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 2000, **153**(1): 170-173.
 [14] YOSHINO K, YOKOYAMA H, MAEDA K, *et al.* Crystal growth and photoluminescence of $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$ alloys[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2000, **211**(1-4): 476-479.
 [15] FERNANDES P A, SALOME P M P. A study of ternary Cu_2SnS_3 and Cu_3SnS_4 thin films prepared by sulfurizing stacked metal precursors [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2010, **43**(21): 215403.
 [16] AVELLANEDA D, NAIR M T S, NAIR P K. Cu_2SnS_3 and Cu_4SnS_4 thin films via chemical deposition for photovoltaic application[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2010, **157**(6): D346-D352.
 [17] BOUAZIZ M, AMLOUK M, BELGACEM S. Structural and optical properties of Cu_2SnS_3 sprayed thin films[J]. *Thin Solid Films*, 2009, **517**(7): 2527-2530.
 [18] CHEN Qing-miao, DOU Xiao-ming, LI Zhen-qing, *et al.* Printed ethyl cellulose/ CuInSe_2 composite light absorber layer and its photovoltaic effect [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2011, **44**(45): 455401.
 [19] MARIAN N, JOOP S, ALBERT G. Nanocomposite three-Dimensional solar cells obtained by chemical spray deposition [J]. *Nano Letters*, 2005, **5**(9): 1716-1719.
 [20] JOHN T T, BINI S, KASHIWABA Y, *et al.*

- Characterization of spray pyrolysed indium sulfide thin films [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2003, **18**(6): 491-500.
- [21] COJOCARU-MIRE DIN O, CHOI P, WUERZ R, *et al.* Atomic-scale characterization of the CdS/CuInSe₂ interface in thin-film solar cells[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **98**(10): 103504.
- [22] BAR M, BARREAU N, COUZINIE-DEVY F, *et al.* Nondestructive depth-resolved spectroscopic investigation of the heavily intermixed In₂S₃/Cu(In, Ga)Se₂ interface[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **96**(18): 184101.
- [23] ROMERO M J, JONES K M, ABUSHAMA J, *et al.* Surface-layer band gap widening in Cu(In, Ga)Se₂ thin films [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **83**(23): 4731-4733.

• 下期预告 •

不同生长环境下砷化镓纳米颗粒的应变场模拟

江子雄, 张求龙, 袁彩雷

(江西师范大学 物理与通信电子学院, 南昌 330022)

摘要: 对于埋嵌在薄膜材料中的纳米颗粒, 在其生长过程中总是不可避免地伴随着应变场的产生, 而这种应变场的分布能反映纳米颗粒的结构变化, 纳米颗粒结构与它的物理性能有重要的关系. 研究埋嵌在不同薄膜材料中的纳米颗粒生长过程中的应变场分布对于调控纳米颗粒的物理性能有着重要的意义. 本文利用有限元算法分别计算了埋嵌在非晶氧化铝薄膜和非晶二氧化硅薄膜材料中的砷化镓纳米颗粒生长过程中的应变场分布. 砷化镓纳米颗粒在以上两薄膜材料生长过程中都受到非均匀偏应变作用. 对于埋嵌在氧化铝薄膜中的砷化镓纳米颗粒, 其生长过程中, 纳米颗粒内部受到的应变大于纳米颗粒表面受到的应变; 而对于埋嵌在二氧化硅薄膜中的砷化镓纳米颗粒, 纳米颗粒内部受到的应变小于纳米颗粒表面受到的应变. 选择砷化镓纳米颗粒生长的薄膜材料可以调控纳米颗粒生长过程中的应变场分布, 从而进一步调控纳米颗粒的晶格结构和形貌及其物理性能.

关键词: 纳米颗粒; 应变; 有限元算法; 薄膜