

非晶硅/微晶硅叠层太阳电池中间层的研究

涂 晔^{1,2} 杨 雯^{1,2} 杨培志^{1,2} 段良飞^{1,2} 张力元^{1,2} 宋肇宁³

¹可再生能源材料先进技术与制备教育部重点实验室, 云南 昆明 650500

²云南师范大学 太阳能研究所, 云南 昆明 650500

³托莱多大学物理与天文学系莱特光伏创新与商业化中心, 俄亥俄州, 托莱多市 43606

摘要 叠层结构是提高硅基薄膜太阳电池效率和稳定性的有效方法,其中子电池的电流匹配是提高叠层电池效率的关键,而中间层技术能有效地改善子电池电流的匹配情况。介绍了非晶硅/微晶硅叠层电池的中间反射层和隧道结的结构、特性及材料种类,结合两者的理论基础提出隧穿反射层的概念,分析其工作原理并给出了薄膜材料的选择原则和范围。隧穿反射层在叠层结构中不仅起到常规中间反射层的作用,解决电池内部的陷光问题,还可优化叠层太阳电池的隧道结,解决子电池对光生载流子的有效收集问题。

关键词 材料; 叠层太阳电池; 中间层; 隧道结; 电流匹配; 隧穿反射层

中图分类号 TN302

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0616003

Research on Interlayer in “a-Si:H/ μ c-Si:H” Tandem Solar Cells

Tu Ye^{1,2} Yang Wen^{1,2} Yang Peizhi^{1,2} Duan Liangfei^{1,2} Zhang Liyuan^{1,2} Song Zhaoning³

¹Key Laboratory of Renewable Energy Advanced Materials and Manufacturing Technology, Ministry of Education, Kunming, Yunnan 650500, China

²Solar Energy Research Institute, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China

³Wright Center for photovoltaics Innovation and Commercialization, Department of Physics and Astronomy, University of Toledo, Toledo, Ohio 43606, USA

Abstract Tandem structure is able to improve the efficiency and stability of silicon-based thin film solar cells. The current matching of sub cells that limiting the efficiency of the tandem devices can be effectively improved by employing an interlayer. This paper introduces the structure, properties and materials of the intermediate reflector and tunnel junction in “a-Si:H/ μ c-Si:H” solar cells. Based on the theoretical foundation, the concept of “tunnel recombination reflector” short for the tunnel recombination junction as a light reflector is proposed and its working principle and materials selection are discussed. In the tandem devices, such interlayer not only plays the role of intermediate reflector that enhances light-trapping, but also optimizes the tunnel junction to improve charger carrier collection.

Key words materials; tandem solar cells; interlayer; tunnel junction; current matching; tunnel recombination reflector

OCIS codes 160.4760; 160.2220; 310.1620; 350.6050

1 引 言

非晶硅/微晶硅(a-Si:H/ μ c-Si:H)叠层电池,简称非/微叠层电池,由不同带隙的a-Si:H顶电池与 μ c-Si:H底电池串联而成。这种叠层结构既能拓宽电池的光谱响应范围,提高太阳光谱的利用率,又能降低不稳定的非晶硅顶电池的厚度,抑制光致衰减(SW)效应,从而改善太阳电池的整体稳定性。然而,叠层结构并不是

收稿日期: 2014-12-03; 收到修改稿日期: 2015-02-26

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(U1037604)

作者简介: 涂 晔(1985—),女,博士研究生,从事硅基薄膜材料及太阳电池方面的研究。E-mail: tuye0106@163.com

导师简介: 杨培志(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事高效太阳能利用材料及器件方面的研究。

E-mail: pzhyang@hotmail.com(通信联系人)

子电池的简单串联,其总电池的电流取决于最小的子电池电流。IMT小组^[1]于1996年提出在非/微叠层电池的子电池之间插入一层中间层,目的就是为了把一部分光反射回顶电池,以提高顶电池的光吸收,从而提高其短路电流密度。Hegedus S等^[2]在1995年研究了非晶硅/非晶硅叠层电池中隧道结的电流输运机制,提高了子电池对载流子的收集。因此,为了提高顶、底电池的匹配电流,研究叠层电池子电池之间的中间层技术非常关键。本文以非晶硅/微晶硅叠层电池的中间层技术为研究对象,分别研究了中间反射层和隧道结的结构、特性及材料种类,结合两者的理论基础提出了隧穿反射层的概念,分析了其工作原理,给出了隧穿反射层薄膜材料的选择原则和范围。

2 中间层

2.1 中间反射层

2.1.1 结构与特性

非/微叠层电池的顶、底电池对可见光波段的响应范围不同,顶电池约为300~700 nm,底电池约为500~1000 nm。由于非晶硅材料存在光致衰减效应,为降低效率的衰减,顶电池本征层的厚度一般较薄,但这会使顶电池的短路电流密度(J_{sc})小于微晶硅底电池的 J_{sc} ,进而影响叠层电池的整体 J_{sc} 。因此为了提高顶电池 J_{sc} ,可以在顶、底电池之间插入一层中间反射层(IR),起到选择性反射层的作用,以提高500~700 nm波段可见光的反射率,进而改善顶电池对短波光的吸收利用率。图1为具有中间反射层的双结叠层电池结构图。

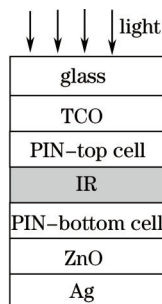


图1 具有中间反射层的双结叠层电池结构

Fig.1 Double junction tandem cells with intermediate reflector

2.1.2 材料种类

中间反射层材料主要有三类:1) 等离子体增强化学气相沉积(PECVD)法制备的硅合金薄膜,如: SiO_x 、 SiN_x 、 SiC_x 、 SiO_xC_y 、 SiO_xN_y 和 SiC_xN_y 等,但研究较多的是N型 $\text{a-SiO}_x:\text{H}$ 和 $\mu\text{c-SiO}_x:\text{H}$;2) 物理溅射或低压力化学气相沉积(LPCVD)、金属有机化合物化学气相沉积(MOCVD)等方法制备的金属氧化物,如: ZnO 、 $\text{ZnO}:\text{Al}$ 、 $\text{ZnO}:\text{Ga}$ 、 SnO_2 、 $\text{SnO}_2:\text{F}$ 、 TiO_2 、 Nb 等,或者化学法结合原子层沉积制备的 $\text{ZnO}:\text{Al}$ 反蛋白石;3) 金属纳米材料,如: Au 、 Ag 纳米颗粒。

IMT选择了 ZnO 作为中间反射层材料,研究了不同厚度的 ZnO 对叠层电池 $I-V$ 特性的影响,并得出 ZnO 厚度应小于100 nm的结论^[3];J Krc等^[4]分别对50 nm厚的 ZnO 和 $n\&k\text{-MgF}_2$ (折射率 n 和消光系数 k 变化的 MgF_2),以及25/5/25 nm厚的 $\text{ZnO}/\text{N-a-Si}:\text{H}/\text{ZnO}$ 作为中间反射层进行了研究,其中采用 ZnO 时子电池的匹配电流最大;C Das等^[5-8]选择的中间反射层材料是 $\mu\text{c-SiO}_x:\text{H}$,其制备工艺与叠层电池顶、底电池的制备相兼容,通过改变制备气体的比值可调控材料的光、电性能;J Üpping等^[9]基于 $\text{ZnO}:\text{Al}$ 反蛋白石材料,研究了三维光子晶体作为中间反射层的应用,据称此三维材料的中间反射层效果是其他类型材料的2.25倍。Kaneka公司研发了一种在600 nm处的折射率为1.7的新材料,获得了良好的中间反射层效果,由此制备的面积为 1 cm^2 的叠层电池的初始效率高达15%,但具体的材料及厚度等参数未见报道。

2.2 隧道结

2.2.1 结构与特性

为了提高顶、底电池电流匹配,除了在子电池交界处插入一层中间反射层之外,还研究了子电池交界处的界面特性,并将此界面称为隧道结或隧穿复合结(TRJ),如图2所示。在硅薄膜叠层太阳能电池 $\text{P}_1\text{I}_1\text{N}_1/\text{P}_2\text{I}_2\text{N}_2$

结构中,隧道结 N_1/P_2 特性的好坏对电池性能参数 V_{oc} 、 I_{sc} 、 F_F 均有重要影响,隧道结 N_1/P_2 相对电池内建电场 E_1 、 E_2 为反偏结,任何寄生势垒都将使电池的电流电压特性变差。而且,若子电池电流不相等,在 N_1/P_2 隧道结处的电子和空穴不能完全复合,则多余的载流子就会在结处积累,削减子电池的电场,进而影响硅基薄膜叠层太阳能电池的性能。因此,为提高叠层太阳能电池的效率,子电池之间需要采用性能良好的隧道结。

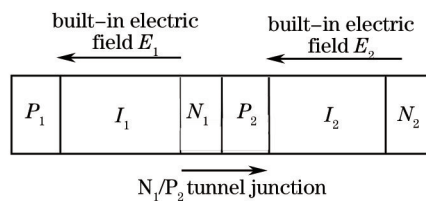


图2 PIN型硅基叠层电池的 N_1/P_2 隧道结结构

Fig.2 N_1/P_2 tunnel junction in PIN silicon-based tandem cells

2.2.2 材料种类

为了降低子电池相邻界面处的寄生势垒,分别对NP隧道结进行了N层、P层厚度调节,以及插入N型或P型非晶硅、非晶硅碳、微晶硅或纳米晶硅的研究。

1) N型硅薄膜及合金

对于柔性衬底上的N-I-P型非/微叠层电池,R L Stolk等^[11]在N型和P型微晶硅之间的隧道结处插入5 nm厚的N型非晶硅层,以减少或阻止顶电池沉积时氢扩散对微晶硅底电池的破坏。Li G J等^[12-13]提出双N层隧道结的概念,即对顶电池的N型层采用了3 nm厚的非晶硅与23 nm厚的微晶硅的组合,减少了顶电池的漏电,进而提高了叠层电池的开路电压和填充因子。Amornrat L等^[14]在非晶硅氧/微晶硅($a\text{-SiO:H}/\mu\text{c-Si:H}$)叠层电池隧道结处插入一层N型微晶硅氧($\mu\text{c-SiO:H}$)层,研究表明改良后的隧道结可提高叠层电池的填充因子(FF)。

2) P型硅薄膜及合金

N. Palit等^[15]通过对隧道结处不同P层材料(分别为 $\mu\text{c-Si:H}$ 和 $a\text{-SiC:H}$)中的自由空穴的运动机理的研究,得出除了隧穿运动、电场作用外,扩散运动起主要作用并使光生空穴朝隧道复合结处移动的结论。提出隧道结处的P型层需具有高的自由空穴密度,以提高电池的FF。Hegedus S等^[2]从I-V特性、温度、量子效率等方面研究了基于非晶硅的N/P隧道结的电流运输机制。在N型层和P型层之间插入一层P型掺硼非晶硅,并将隧道结的非晶硅层用微晶硅层取代,能降低电阻率增加载流子在结处的复合率。Lanli Chen等^[16]研究了叠层电池中高质量的N-P⁺-P($a\text{-Si/na-Si}/\mu\text{c-Si}$)隧道结,认为隧道结处插入P⁺-na-Si层后的缺陷态密度能达到 $2.7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$,比插入P⁺-a-Si层获得的复合几率高,且阻抗值低。Ping-Kuan Chang等^[17]研究了非晶硅/非晶硅叠层电池的隧道结,结构为:N-P-P($\mu\text{c-Si:H}/\mu\text{c-Si:H}/a\text{-SiC:H}$),通过调整顶、底电池本征层的厚度(60 nm和250 nm),得到最优的非/非叠层电池的初始转换效率为10.29%。

3 新型隧穿反射层的提出

3.1 基于良好光学特性的中间反射层

电池的光电转换过程中还存在光的反射和透射损失,因此需要寻求好的光管理设计方案。虽然目前已提出很多方法来尽量降低这些损失,如各类陷光结构和绒面材料,以及背反射电极等,但这些技术与结构还有很大的发展空间。中间反射层是电池内部陷光的一个关键层,不仅起到承上启下的作用,还有利于抑制光致衰减。中间反射层的插入可提高硅基薄膜叠层电池界面处短波段光的反射率,在对底电池光谱响应范围影响不大的情况下,可增大非晶硅顶电池的短路电流密度,从而提高子电池的电流匹配度,进而增加电池的整体转换效率。图3为叠层电池插入中间反射层后子电池交界处的光线传输分布。

顶电池非晶硅的带隙(E_g)大于底电池微晶硅的带隙,因此从可见光光谱分布来看,顶电池主要吸收短波光,而底电池主要吸收长波光;同时,由于非晶硅和微晶硅的折射率相近,分别约为3.1和3.3,使子电池界面处可见光的反射率较低。基于这两点,中间反射层材料必须具有一定的折射率和厚度,即必须满足对短波段光(500~700 nm)反射率高,对长波段光(700~1000 nm)透射率高的特性。本课题组^[18]对叠层电池中间反射层的光学性能做了一定的研究,模拟计算表明中间反射层的反射率与各层折射率有着密切相关的联系;

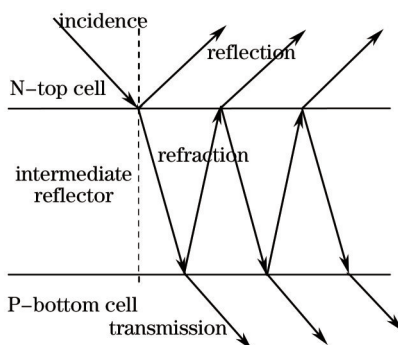


图3 叠层电池中间反射层界面处的光线传输分布

Fig.3 Light transmission distribution at the interface of intermediate reflector in tandem cells

$$R = \frac{n^2(n_i - n_b)^2 \cos^2 \frac{\delta}{2} + (n^2 - n_i n_b)^2 \sin^2 \frac{\delta}{2}}{n^2(n_i + n_b)^2 \cos^2 \frac{\delta}{2} + (n^2 + n_i n_b)^2 \sin^2 \frac{\delta}{2}}, \quad (1)$$

式中 R 为中间反射层处的反射率, n 、 n_i 、 n_b 分别为中间反射层、顶电池 N 层以及底电池 P 层的折射率, δ 为顶电池 N 层与中间反射层交界处可见光的入射角。

由(1)式推导计算出 $R_{\max} = \left(\frac{n^2 - n_i n_b}{n^2 + n_i n_b} \right)^2$, 理论上当 $n \ll \sqrt{n_i n_b}$ 时, R_{\max} 能趋近于 100%, 但 R_{\max} 过大势必会影响底电池对长波光的吸收。经计算得出中间反射层材料的折射率 n 约为 1.59, 厚度约为 $150/n$ 即 94.3 nm 时, 对波长为 500~700 nm 可见光的 R_{\max} 可达到 35.96%。

3.2 基于良好电学性能的隧道结

叠层电池中, 隧道结是一个与子电池内建电场方向相反的 PN 结, 在工作状态下, 本征层内的光生电子和光生空穴会在内建电场的作用下分别向 N 层和 P 层移动。对于 PIN 型非/微叠层电池来说, 非晶硅顶电池的光生电子和微晶硅底电池的光生空穴必须在隧道结处快速复合, 以免电荷积累而削弱内建电场, 减少顶、底电池对光生载流子的收集, 进而降低电池的匹配电流。图 4 为叠层电池隧道结的工作原理。

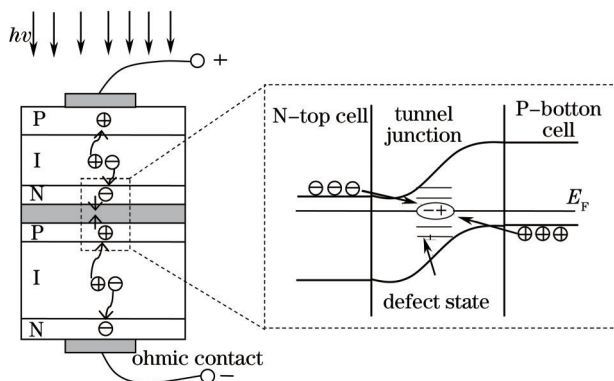


图4 隧道结的工作原理

Fig.4 Working principle of tunnel junction

由图 4 可知, 光生电子和光生空穴分别从 N 层和 P 层隧穿到同一个缺陷态, 发生隧穿复合, 复合速率 U_N 为

$$U_N = N_t r_n n_u e^{-\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m(U_0 - E)}d}, \quad (2)$$

式中 N_t 为缺陷态密度, r_n 为电子俘获系数, n_u 为从顶电池 N 层向隧道结移动的光生电子数, U_0 与 d 分别为势垒高度与宽度, E 为电子动能。不同材料的 N_t 、 U_0 与 d 均不同, 但由(2)式可知, 复合速率 U_N 的影响因素主要来自于缺陷态密度 N_t 。因此, 只要缺陷态密度足够高, 光生载流子就会在隧道结处完全复合, 不产生寄生势垒, 也不会对子电池的电场产生影响。

综上所述, 研究隧道结技术的重点就是如何提高结界面处的复合速率, 目前行之有效方法就是在结界面处生长一层重掺杂的硅合金薄膜或高缺陷态的氧化物, 例如 NbO_x 、 TiO_x 、 SiO_x 等。

3.3 兼具良好光学性能与电学性能的隧穿反射层

3.3.1 隧穿反射层的工作原理

目前,对叠层结构所引入的中间反射层和隧道结的研究尚是独立的,具有选择性反射作用的中间反射层是基于光学的反射与透射原理,具有较大缺陷态密度的隧道结是基于电学的隧穿复合理论,其研究成果难以大幅提高叠层太阳能电池的性能。

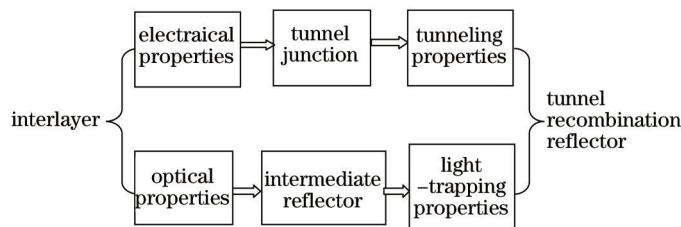


图5 隧穿反射层的提出

Fig.5 Proposing the tunnel recombination reflector

如图5所示,综合考虑叠层结构的子电池界面对整个电池的光学性能和电学性能的影响,结合中间反射层的作用与隧道结的原理,在子电池界面处制备一层既具有选择性反射作用,又具有高缺陷态密度的薄膜,称此兼具陷光性能和隧穿性能的薄膜为隧穿反射层(TRR),以改善硅基薄膜叠层太阳能电池的电流匹配度,降低光学损失与电学损失,提高电池效率和稳定性。图6为隧穿反射层的工作原理。

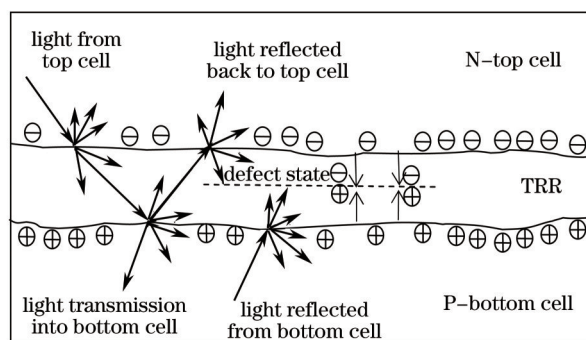


图6 隧穿反射层的工作原理

Fig.6 Working principle of tunnel recombination reflector

由图6可看出 TRR 兼具了中间反射层的光学优点和隧道结的电学性能,一方面起到选择性反射的作用,解决叠层电池内部的陷光问题,另一方面优化了叠层太阳能电池的隧道结,解决顶、底电池内部对光生载流子的有效收集问题。隧穿反射层具有宽带隙、高电导率、低折射率、高缺陷态密度等特点,能有效地提高硅基薄膜叠层太阳能电池的转换效率和稳定性。

3.3.2 隧穿反射层材料的选择原则

鉴于中间反射层的折射率须尽量靠近 1.59,且具备足够高的电导率和宽带隙,同时隧道结必须具备高的缺陷态密度,因此,低折射率、高电导率、宽带隙、高缺陷态密度等要求成为隧穿反射层材料的选择原则。

1) 硅基薄膜合金

非晶硅薄膜材料可以与锗(Ge)、碳(C)和氧(O)等元素形成合金来调节其光学与电学性能。

非晶硅锗(a-SiGe:H)合金材料具有较窄的带隙,通过改变 Ge 含量,可实现 a-SiGe:H 合金的带隙在 1.1~1.7 eV 之间进行调控,其带隙随锗含量增加而降低,a-SiGe:H 合金的带隙过窄不符合隧穿反射层的选择原则。非晶硅碳(a-SiC:H)合金薄膜材料具有较宽的带隙,通过改变 C 含量可实现 a-SiC:H 合金薄膜的带隙在 1.7~2.2 eV 之间变化,且 a-SiC:H 合金材料缺陷态密度较高,适宜做隧道结材料,但其折射率通常在 2.6 以上,不符合隧穿反射层对低折射率的要求。

非晶硅氧(a-SiO:H)合金材料也是一种宽带隙薄膜材料,通过改变 O 含量还可以对 a-SiO:H 合金薄膜带隙进行调控。相应的 SiO 及 SiO₂ 材料的折射率在 1.46~1.55 之间,属低折射率材料,改变 O 含量也可以调节 SiO₂ 薄膜的折射率。此外,随着氧含量的增加,缺陷态会增加一个数量级(由于 O 为二配位,Si 为四配位,配位

数的差异造成悬挂键增加)。然而, O 增加也会导致光电导率下降, 故须对薄膜进行金属掺杂。经金属掺杂后的 a-SiO:H 或 SiO₂ 薄膜, 由于其电导率大大提升, 且缺陷态密度高, 同时还属于宽带隙及低折射率材料, 非常适宜于用作隧穿反射层。图 7 为硅氧薄膜掺杂后的二维(2D)网络结构。

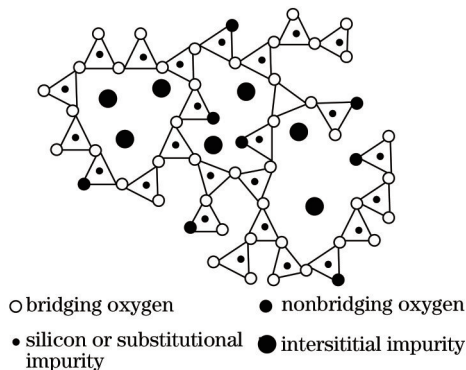


图 7 掺杂后的硅氧薄膜二维网络结构

Fig.7 2D network structure of doped SiO₂ thin film

由上图可知, 非桥键氧原子和键不饱和的硅原子会带入悬挂键, 掺杂后的间隙式杂质与替位式杂质会引入大量的缺陷。由于金属杂质铝在硅氧网络中, 既可以起间隙式杂质, 又可以起替位式杂质的作用, 用铝掺杂较其他杂质能更有效地提高硅氧薄膜的缺陷态密度, 且氧化硅与氧化铝混合物的折射率大概在 1.65 左右。因此, 掺铝的硅氧薄膜将会是非常好的隧穿反射层材料。

2) 金属化合物

NbO₃、TiO₃ 等金属氧化物非常适宜做隧道结材料, 因其具有高缺陷态密度, 但两者的折射率过高, NbO₃ 的折射率大于 2.3, TiO₃ 的折射率大于 2.5, 均不符合隧穿反射层对低折射率的要求; 金属氧化物 ZnO 及 AZO (ZnO: Al) 因透明、导电、折射率适中(约为 2.0) 而成为中间反射层材料的研究热门, 但由于其具有横向分流的电学特性, 会对叠层电池性能造成一定的影响; 其他透明导电膜(TCO) 薄膜, 如掺杂的 SnO₂: F(FTO)、SnO₂: Sb(ATO) 和 In₂O₃: Sn(ITO) 等, 均为重掺杂材料, 不仅带隙宽, 而且具有高电导率, 光电性质随掺杂金属的氧化状态及浓度可调, 是很好的隧道结材料, 但是其折射率均在 2.2 以上, 不太符合隧穿反射层材料的选择要求; 其他金属化合物, 如 MgF₂ 和 LiF 等材料折射率均小于 1.4, CaF₂ 折射率在 1.5 左右, 重金属(如: Cu、Ag、Au 等) 掺杂能改善其导电性, 增加缺陷密度, 但随掺杂浓度的增加会使带隙一定程度上变窄, 折射率变大, 且材料具有一定的毒性。若使用恰当, 并调整好平衡掺杂浓度, MgF₂、LiF 和 CaF₂ 等金属氟化物将会是很有潜力的隧穿反射层材料。

4 结 论

通过以上总结可知, 研究子电池之间的中间层技术, 即研究中间反射层及隧道结对提高顶、底电池的匹配电流, 提高叠层电池的整体转换效率非常关键。目前, 对叠层结构的上述两方面研究尚独立进行: 具有选择性反射作用的中间层是基于光学的反射与透射原理; 而具有较大缺陷态密度的隧道结是基于电学的隧穿复合理论, 其研究成果难以大幅提高叠层太阳电池的性能。对叠层电池的子电池交界处的中间层进行了细致的研究, 主要包括以下三个方面: 1) 基于光学性能的中间反射层; 2) 基于电学性能的隧道结; 3) 结合光学性能和电学性能的新型隧穿反射层。隧穿反射层材料的选择原则为低折射率、高电导率、宽带隙、高缺陷态密度等。在硅薄膜合金和金属化合物薄膜材料中, 掺杂的硅氧薄膜与金属氟化物将有潜力成为隧穿反射层材料。

参 考 文 献

- 1 Fisher D, Dubail S, Selvyssan J A A, *et al.*. The "micromorph" solar cell: extending a-Si:H technology towards thin film crystalline silicon[C]. Proceedings of 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington DC, 1996: 1053-1056.
- 2 Hegedus S, Kampas F, Xi Jianping. Current transport in amorphous silicon n/p junctions and their application as "tunnel" junction in tandem solar cells[J]. Applied Physics Letters, 1995, 67(6): 813-815.

- 3 Domine D, Bailat J, Steinhauser J, *et al.*. Micromorph solar cell optimization using a ZnO layer as intermediate reflector[C]. Proceedings of 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Hawaii, 2006: 1456–1468.
- 4 J Krc, K Brecl, F Smole, *et al.*. The effects of enhanced light trapping in tandem micromorph silicon solar cells[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2006, 90(18): 3339–3344.
- 5 C Das, A. Lambertz, J. Huepkas, *et al.*. A constructive combination of antireflection and intermediate reflector layers for a-Si/ μ c-Si thin film solar cells[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(5): 053509.
- 6 V Smirnov, A Lambertz, B Grootenok, *et al.*. Microcrystalline silicon oxide (μ c-SiO_x:H) alloys: a versatile material for application in thin film silicon single and tandem junction solar cells[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 2012, 358(17): 1954–1957.
- 7 A. Lambertz, V. Smirnov, T. Merdzhanova, *et al.*. Microcrystalline silicon-oxygen alloys for application in silicon solar cells and modules[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2013, 119: 134–143.
- 8 Lisha Bai, Bofei Liu, Xiaodan Zhang, *et al.*. The trade-off light trapping between top and bottom cell in micromorph tandem solar cells with sputtering ZnO:Al glass substrate[J]. Journal of Power Sources, 2014, 266(15): 138–144.
- 9 J üpping, A Bielawny, Ralf B Wehrspohn, *et al.*. Three-dimensional photonic crystal intermediate reflectors for enhanced light-trapping in tandem solar cells[J]. Advanced Materials, 2011, 23(34): 3896–3900.
- 10 Yamamoto K, Nakajima A, Yoshimi M, *et al.*. High efficiency thin film silicon hybrid cell and module with newly developed innovative interlayer[C]. Proceedings of 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Hawaii, 2006: 1489–1492.
- 11 R L Stolk, H Li, C H M van der Werf, *et al.*. Improvement of the tunnel-recombination junction in N-I-P micromorph tandem silicon solar cells with hot-wire deposited absorber layers[C]. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, 2, 2004: 1.
- 12 Li G J, Hou G F, Han X Y, *et al.*. The study of a new n/p tunnel recombination junction and its application in a-Si:H/ μ c-Si:H tandem solar cells[J]. Chinese Physics B, 2009, 18(4): 1674–1678.
- 13 Hou Guofu, Lu Peng, Han Xiaoyan, *et al.*. Improving the light-soaking stability of a-Si:H/ μ c-Si:H tandem solar cells[J]. Acta Phys Sin, 2012, 61(13): 138401.
侯国付, 卢 鹏, 韩晓艳, 等. 提高非晶硅/微晶硅叠层太阳能电池光稳定性的研究[J]. 物理学报, 2012, 61(13): 138401.
- 14 Amornrat L, Songkiate K, Sorapong I, *et al.*. Advantages of N-Type hydrogenated microcrystalline silicon oxide films for micromorph silicon solar cells[J]. International Journal of Photoenergy, 2013, 2013(06): 513284.
- 15 N Palit, A Dasgupta, S Ray, *et al.*. Hole diffusion at the recombination junction of thin film tandem solar cells and its effect on the illuminated current-voltage characteristic[J]. Journal of Applied Physics, 2000, 88(5): 2853–2861.
- 16 Lanli Chen, Mingji Shi, Jiahui Yu. Good quality n(a-Si)-p⁺(na-Si)-p(μ c-Si) tunnel junction for tandem solar cells[J]. Solid State Phenomena, 2012, 181–182: 336–339.
- 17 Pingkuan Chang, Chunhsung Lu, Chihhung Yeh, *et al.*. High efficiency a-Si:H/a-Si:H solar cell with a tunnel recombination junction and a n-type μ c-Si:H layer[J]. Thin Solid Films, 2012, 520(9): 3684–3687.
- 18 Tu Ye, Yang Wen, Yang Peizhi, *et al.*. Optical design and calculation of interlayer in thin film silicon tandem solar cells[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0622006.
涂 晔, 杨 雯, 杨培志, 等. 硅基薄膜叠层太阳能电池中间层的光学设计与计算[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0622006.

栏目编辑: 韩 峰