

太阳能电池光管理用异型分布布拉格反射镜设计与制作技术

周 健¹ 李红飞^{1,2} 刘毓成¹ 谈惠祖¹ 刘正新¹

(¹ 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 根据多光束干涉原理, 基于迭代算法, 设计出用于异质结太阳能电池的异型分布布拉格反射 (IDBR) 结构。通过优化设计 S1 (500 nm+800 nm)、S2 (500 nm+900 nm)、S3 (500 nm+1000 nm)、S4 (500 nm+800 nm+1000 nm) 4 种不同中心波长组合的异型布拉格背反射结构, 发现 S3 具有最佳宽频带高反射效果, 该异质结由两对非晶硅 (32 nm)/氮化硅 (61.78 nm) 分布式布拉格反射 (DBR) 结构与三对非晶硅 (64 nm)/氮化硅 (123.57 nm) DBR 结构组成。借助等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 的方法在异质结太阳能电池背面生长出具有五对 α -Si:H/SiN 结构的异型布拉格反射镜, 并测试其反射光谱曲线。实验证明该异型布拉格反射镜在 730~1155 nm 的光谱范围内反射率达到 90%, 在 750~1110 nm 波长范围内的反射率高达 95%, 从而具有显著提高太阳能电池的宽谱吸收效率的潜力, 可以对 1000~1155 nm 范围内的红外光进行有效反射, 增强电池对红外波段的吸收。

关键词 薄膜; 光电子学; 太阳能电池; 异型分布布拉格反射镜; 迭代法

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0931003

Design and Fabrication of an Irregularly Shaped Distributed Bragg Reflector for Hetero-Junction with Intrinsic Thin Layer Solar Cells

Zhou Jian¹ Li Hongfei^{1,2} Liu Yuchen¹ Tan Huizu¹ Liu Zhengxin¹

(¹ Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract An irregularly shaped distributed Bragg reflector (IDBR) for hetero-junction with intrinsic thin layer (HIT) solar cells is designed and fabricated according to the theory of multi-beam interference and the method of iteration. Four types of IDBRs [S1 (500 nm+800 nm), S2 (500 nm+900 nm), S3 (500 nm+1000 nm), S4 (500 nm+800 nm+1000 nm)] are compared and optimized. The result shows that the structure of S3 with two pairs of α -Si (32 nm)/SiN (61.78 nm) and three pairs of α -Si:H (64 nm)/SiN (123.57 nm) is the most suitable structure. With the help of plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD), five pairs of α -Si:H/SiN distributed Bragg reflector (DBR) multi-layer films is deposited on the back surface of HIT solar cell. The testing result shows that the reflectivity of S3 is larger than 90% in the wavelength range of 730~1155 nm, and larger than 95% in the wavelength range of 750~1110 nm, which shows the great potential for improving the absorption of light in the wavelength range of 1000~1155 nm (infrared wavelength range), and thus enhance the efficiency of HIT solar cell.

Key words thin films; optoelectronics; solar cell; irregularly shaped distributed Bragg reflector; iteration

OCIS codes 310.4165; 310.1860; 310.6805

收稿日期: 2013-03-25; 收到修改稿日期: 2013-04-22

基金项目: 上海市 AM 基金 (09520714700)、上海市自然科学基金 (09ZR1437500)、中国科学院重要方向项目 (KGCX2-YW-399+1)、中国科学院院地合作项目 (YDJDBNJ-2012-027)

作者简介: 周 健 (1970—), 男, 副研究员, 主要从事半导体材料与器件的设计与工艺, 多层薄膜热、电、光设计技术, 薄膜和晶硅太阳能电池技术等方面的研究。E-mail: zjian@mail.sim.ac.cn

1 引言

太阳能电池的高效与低成本与否是决定其是否能够推向应用的重要因素,如何调节可见光波段的太阳能电池结构和效率已多有研究^[1-2]。高效太阳能电池红外光管理异型分布布拉格反射(IDBR)结构的设计与制作技术作为晶硅系太阳能电池的高效化关键技术,成为学界和企业界关注的焦点,对于推动太阳能电池的规模化应用具有重要的价值。常规异质结太阳能电池(HIT)太阳能电池通常采用氧化铟锡(ITO)薄膜作为背表面的导电层和钝化层,尽管对抑制 1000 nm 以下波长范围内的透射有一定好处,但对抑制长波长(大于 1000 nm)范围的光的透射没有明显作用。实验数据表明,180 μm 厚度的硅片,在 1000~1200 nm 波长范围内,其透射达到 10%~30%,而高效晶硅太阳能电池的光谱响应范围为 300~1200 nm,即在可见光和红外波段具有光谱响应,如果不经过电池结构优化,1000~1200 nm 波段的红外光得不到有效利用。另一方面,为了节省成本,HIT 电池采用更薄的 Si 衬底将成为趋势,如日本三洋公司正在研究 80 μm HIT 电池,在该类电池中如果不采用结构优化,不仅红外,可见光范围内也将出现漏光。综上所述,为了适应未来低成本、高效 HIT 技术和市场发展的需要,有必要开展电池背表面反射增强的设计优化研究。

已有部分文献针对薄膜太阳能电池的背反射结构设计方面的报道,主要是针对 IDBR 结构设计在薄膜太阳能电池中的宽频高反射研究^[3],少有针对晶硅系太阳能电池分布式布拉格反射(DBR)结构的报道。已有的关于晶硅系太阳能电池的报道^[4-5]中采用 Ag 在背面作为背反射层,但大大增加了工艺成本,从而增加电池的每瓦成本,而且 Ag 薄膜工艺往往采用蒸发方法成膜,需要将电池片取出利用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)到蒸发设备中进行 Ag 成膜,从而增加成本,使得该高效电池优势丧失,最终将影响到该类电池走向应用。

本文基于麦克斯韦方程和坡印亭矢量原理^[6],借助 Matlab 软件编程计算模拟,提出与 HIT 结构相匹配的 IDBR 结构,并对该结构进行优化设计,获得最佳结构,有效降低电池的长波透射率。基于半导体工艺技术,采用先进 PECVD 设备,实现低温沉积高均匀氮化硅和非晶硅薄膜工艺,成功制备出 IDBR 结构,不仅保证布拉格结构的表面均匀性,同时减少 IDBR 工艺温度对电池性能的影响。表面反射率测试结果表明,IDBR 结构能够有效地增强红

外波段的背反射,为增强电池对该波段光的吸收做出贡献,为该类电池的低成本应用提出了新思路。

2 理论部分

2.1 布拉格理论

光子带隙结构(布拉格反射结构)在某段波段范围内具有较高的反射效率。其原理是由高折射率层和低折射率层交替叠成的膜系,具有周期性和准周期性,材料的周期尺度与光波长近似,特定波段的光波在该结构中产生共振,传播受限于一维光子结构,从而形成光传播的带通和带阻现象。直观的表现是,在某段频段材料结构表面表现出高反射率,而在其他波段则是较低反射率。即在光子晶体结构中,沿着材料结构受到调制的方向,某段频率的光的传播受到阻碍。如图 1 所示。各层厚度分别为

$$t_H = \lambda_0 / (4n_H), t_L = \lambda_0 / (4n_L), \quad (1)$$

其中 n_H 、 n_L 分别为高、低折射率材料的折射率, λ_0 为布拉格反射镜的中心波长。当两界面的反射光的相位相差 π 时,反射最为强烈。在两种不同介质的每一个交界面,一部分入射光被反射,各界面的反射光发生相长干涉,在布拉格结构表面形成较强的反射。实际上,在包含中心波长 λ_0 的某一波长范围内,DBR 具有高反射率,称为光子禁带,即这一波长范围的光被禁止在 DBR 中传播,通过改变中心波长,可得到操作频率范围不同的反射镜。此外,介质 DBR 克服了金属(如 Ag)反射镜本身对光的吸收问题,具有重要的应用前景。讨论 DBR 组成材料的折射率差及层数对其反射特性的影响,通过数值计算,

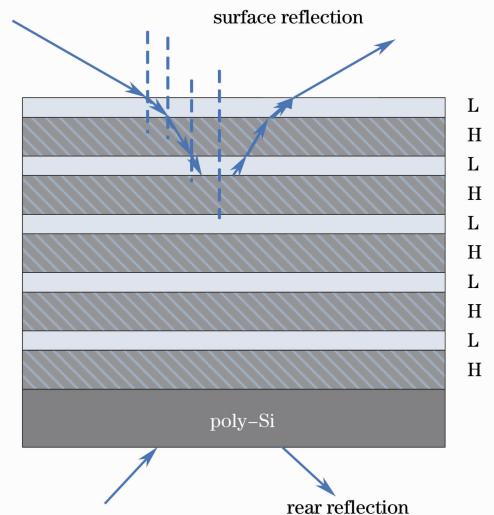


图 1 异型分布布拉格反射镜

Fig. 1 Structure of irregularly shaped DBR

选择合适的组成材料及层数,在可见光红外波段获得最佳反射效果。

2.2 基于坡印亭矢量原理和麦克斯韦方程的多层薄膜的光学反射

如图 1 所示,一束沿 Z 轴方向传输的平面偏振

光入射到多层膜面上。运用麦克斯韦方程组和坡印亭矢量定理^[6],不难得出第 k 层电矢量的幅值 $A_1^{(k)}$ 及第 k 层和第 $k-1$ 层界面反射率 $R(= A_2^{(k)} A_2^{(k)})$ 。 $A_1^{(k)}$ 、 $A_2^{(k)}$ 可表示为

$$A_1^{(k)} = \{ \exp\{-i[2\pi n^{(k+1)}/\lambda_0]z_{(k+1)}\} + A_2^{(k+1)} \exp\{-i[2\pi n^{(k+1)}/\lambda_0]z_{(k+1)}\} \} A_1^{(k)} / (1 + A_2^{(k)}), \quad 1 \leq k \leq N, \quad (2)$$

$$A_2^{(k)} = \{ [n^{(k,k-1)} + A_2^{(k-1)}] / (1 + n^{(k,k-1)} A_2^{(k-1)}) \} \exp\{-i[4\pi n^{(k)}/\lambda_0]z_k\} n^{(k,k-1)} = [n^{(k)} - n^{(k-1)}] / [n^{(k)} + n^{(k-1)}], \quad 2 \leq k \leq N+1. \quad (3)$$

假设入射光强为单位光强, $A_1^{(N+1)}$ 应取为 1.414, N 为多层膜层数。又由于基片上光的反射分量为零,所以 $A_2^{(1)} = 0$ 。

算法上,目前对一维光子晶体进行分析的理论方法为时域有限差分法(FDTD),它是求解电磁波在结构中传播的一种数值求解方法。FDTD 直接将有限差分式代替麦克斯韦时域场旋度方程中的微分式。无论是常微分方程还是偏微分方程,各类二阶线性和高阶非线性方程都可以通过 FDTD 方法转变为线性方程求解。根据以上(2)式和(3)式的边界条件,借助迭代法,采用 Matlab 软件编程计算,可以得到多层薄膜表面反射率。

3 与双面电池结构匹配的布拉格多层薄膜结构的优化设计

3.1 介质材料的选择

尽管 Ag 或 Al 等金属材料在现有的研究和生产工艺中得到部分应用^[4-5],但金属介质一方面价格比较贵,另一方面在较宽的波长范围内具有较大的消光系数 k ,往往造成光能损失,降低电池组成材料(如 Si)对光能的吸收效率。从提高电池陷光效率角度考虑,硅化合物或半导体成为 DBR 结构的优选材料;另外 IDBR 中非晶硅和氮化硅沉积工艺与 HIT 太阳能电池中的非晶硅工艺比较类似,都可以采用 PECVD 成膜,因此,从工艺便利性和成本考虑,结合 HIT 太阳能电池的工艺,非晶硅作为高折射率材料,其折射率 $n_{\text{Si}} = 3.88$,氮化硅作为低折射率材料,其折射率为 $n_{\text{SiN}} = 2.023$,组合成为布拉格结构是比较好的选择。

3.2 DBR 对数的选择

当 DBR 的诸反射光束中相继两光束的相位差等于 π 时,该波长的反射光获得最强烈的反射。而当相继的两束反射光相位差为 $\pi/2$ 时,两束反射光

将相互抵消,此时布拉格反射效果最弱。由此形成布拉格反射镜在一定带宽内具有较高反射率。图 2 为中心波长为 1000 nm 时不同对数布拉格反射镜(1,2,3,4,5 对)的反射仿真结果,布拉格反射镜的反射带宽为 800~1200 nm。布拉格反射率随布拉格层数的增加而增加,布拉格反射层越多,反射效果越好。当布拉格对数为 1~3 对时,增加显著,当对数为 3~5 对时,反射率的增幅不明显,4 对和 5 对 DBR 的反射率在 95% 以上。因此,为了同时获得较好的带宽下的高反射率(90% 以上)和最少层数(低成本要求),对应于中心波长的 α -Si/SiN 的 DBR 结构至少需 3 对。

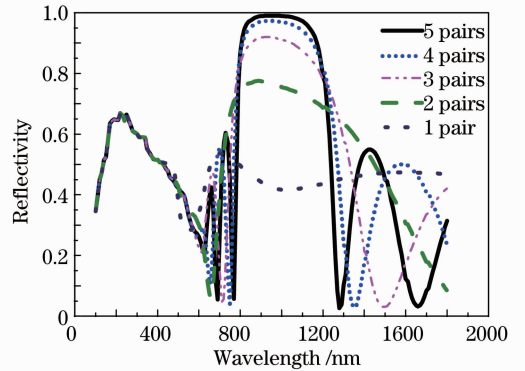


图 2 不同分布布拉格反射镜对数下反射率随波长的变化关系

Fig. 2 Relation between reflectivity and wavelength for different pairs of DBR

3.3 异型布拉格反射结构设计

从图 2 中不难发现,一定的中心波长对应一定的 DBR 中非晶硅和氮化硅厚度,也对应 DBR 反射镜的高反射带宽。考虑到 HIT 太阳能电池中非晶硅对光能的吸收波长范围较宽(350~1200 nm),有必要设计出在较宽波长范围内的高反射布拉格结构,实现 HIT 太阳能电池更宽波段内的光能吸收效率的提升。

采用不同中心波长的布拉格结构组合成新型布拉格反射镜(这里称为 IDBR),有望获得更大的反射带宽。根据 3.2 节讨论结果, α -Si/SiN DBR 只需 3 对即可基本满足对 DBR 高反射率(90%)的要求。选择较厚的 3 层 α -Si/SiN DBR (中心波长在 1000 nm 左右)置于底层,选择较薄的 α -Si/SiN DBR (中心波长在 500 nm 左右)置于上层。考虑到上层结构对短波长光子具有较高的反射作用,下层结构对长波长光子具有较高的反射作用,上层未吸收的光子可以在下层 3 对厚 DBR(中心波长在 1000 nm 附近)中得以吸收,又考虑到工艺简便性,先择上层 DBR 结构对数为 2 对,结构如图 1 所示。由(1)式,计算得 DBR 各层厚度从下至上分别为: $t_{\text{SiN}} = 123 \text{ nm}$, $t_{\text{Si}} = 64 \text{ nm}$, $t_{\text{SiN}} = 123 \text{ nm}$, $t_{\text{Si}} = 64 \text{ nm}$, $t_{\text{SiN}} = 123 \text{ nm}$, $t_{\text{Si}} = 64 \text{ nm}$, $t_{\text{SiN}} = 61 \text{ nm}$, $t_{\text{Si}} = 32 \text{ nm}$, $t_{\text{SiN}} = 61 \text{ nm}$, $t_{\text{Si}} = 32 \text{ nm}$ 。

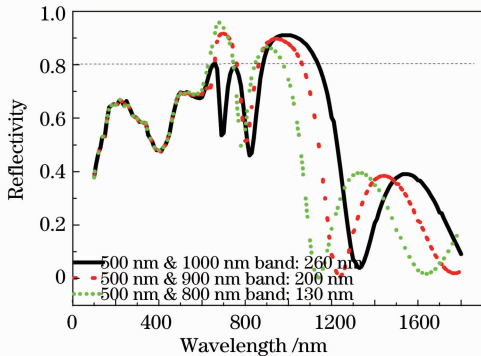


图 3 不同中心波长组合下反射率随波长变化规律

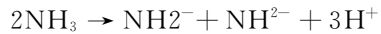
Fig. 3 Reflectivity versus wavelength under different central wavelength combinations

图 3 表示不同中心波长组合下反射率随波长变化规律,其中绿色表示(500+800) nm 中心波长组合;红色表示(500+900) nm 中心波长组合;黑色表示(500+1000) nm 中心波长组合。不难发现,随着第二中心波长的增加,带宽不断增加,(500+800) nm, (500+900) nm 和(500+1000) nm 三对中心波长组合的带宽分别为 130, 200, 260 nm。使用该结构可以获得 200~1200 nm 波段范围 60%以上的反射率。与单一的 DBR 结构(图 2)相比,在可见光范围内具有更高的反射率。由此可见,采用较大的中心波长,可以获得更宽带宽下的高反射率效果。这里所采用的非晶硅折射率 $n_{\text{Si}} = 3.88$, 氮化硅折射率为 $n_{\text{SiN}} = 2.023$, 是比较理想的数值,实际工艺过程中薄膜将会随着工艺条件变化,而且随着波长的变化而变化,因此在实际参数计算和模拟过程中需要进行相应调整,以提高模拟精度。

4 实验与讨论

4.1 IDBR 实验制备方法

实验采用 Oxford Plasma Lab System100 型 PECVD 设备在多晶硅片上沉积 α -Si:H 和 SiO_2 薄膜, SiH_4 纯度为 99.999%, N_2O 的纯度为 99.995%, 衬底加热温度为 200 °C, α -Si:H 生长速度为 38 nm/min; SiO_2 薄膜的生长速率为 48 nm/min。将系统抽真空至最佳本底真空 $3 \times 10^{-4} \text{ Pa}$, 加热衬底至 200 °C, 通入反应气体 SiH_4 和 NH_3 , 等待 5 min 后衬底温度达到稳定, 先沉积 SiO_2 , 然后开始只通入 SiH_4 反应气体生长非晶硅薄膜, 然后周期性生长氮化硅薄膜和非晶硅薄膜, 形成这种 IDBR 结构^[7], 厚度结构如表 1 所示。DBR 多层膜反射率采用 U4100 Spectrophotometer 反射仪测量。



按表 1 所示的理想厚度调整各层的生长时间, 在硅片上生长出 IDBR 结构。 α -Si/SiN 结构的 DBR 的各层厚度如表 1 所示。

4.2 基于双面电池的 IDBR 制备方法

选择 n 型 Si 片完成双面电池制作工艺, 将做好背面 ITO 和完成丝网印刷栅线的电池背面进行涂胶、光刻、显影, 栅线部分由胶覆盖, 其余部分镂空, 然后在 Si 电池背表面沉积周期性的 IDBR 多层薄膜, 丙酮超声剥离, 露出栅线。图 4 是形成双面电池背反射镜的光刻剥离工艺流程。

4.3 不同 IDBR 结构对高反射带宽的影响

图 5 表示实验制备出的 IDBR 前面反射率测量结果。图 5 中 S1 表示 500 nm 和 800 nm 中心波长组合; S2 表示 500 nm 和 900 nm 中心波长组合; S3 表示 500 nm 和 1000 nm 中心波长组合; S4 表示 500 nm、800 nm 和 1000 nm 中心波长组合。由图 5 可见, 对于 S2~S4 结构, 随着 IDBR 的结构调整, IDBR 的中心波长增加, 高反射带宽不断增加。对比 S3 和 S4 可以发现, S3 带宽大于 S4, 说明并不是中心波长越多越有利于形成宽谱高反射, 因此, 考虑到高反射带宽性能和工艺简便性, S3 结构 IDBR 是最好的工艺选择。实验与模拟结果的偏差主要可能是由于制备过程中薄膜工艺沉积的气流不稳定和衬底温度不均导致的薄膜厚度不均以及薄膜折射系数的不均匀。而模拟结果假设了薄膜表面为理想平面。因此为了提高模型精度, 有必要进一步细化模型参数, 采用带有表面织构的模拟软件模拟, 获得更为准确的模拟结果。

表 1 异型分布布拉格反射镜各层厚度
Table 1 Thicknesses of each layer for IDBR

	S1(500+800 nm)	S2(500+900 nm)	S3(500+1000 nm)	S4(500+800+1000 nm)
Si substrate	Poly-Si(180 μm)	Poly-Si(180 μm)	Poly-Si(180 μm)	Poly-Si(180 μm)
1st layer	SiN(99 nm)	SiN(111 nm)	SiN(123.58 nm)	SiN(123.58 nm)
2nd layer	α -Si(51.5 nm)	α -Si(58 nm)	α -Si(64.4 nm)	α -Si(64.4 nm)
3rd layer	SiN(99 nm)	SiN(111 nm)	SiN(123.58 nm)	SiN(123.58 nm)
4th layer	α -Si(51.5 nm)	α -Si(58 nm)	α -Si(64.4 nm)	α -Si(64.4 nm)
5th layer	SiN(99 nm)	SiN(111 nm)	SiN(123.58 nm)	SiN(123.58 nm)
6th layer	α -Si(51.5 nm)	α -Si(58 nm)	α -Si(64.4 nm)	α -Si(64.4 nm)
7th layer	SiN(61.78 nm)	SiN(61.58 nm)	SiN(61.58 nm)	SiN(123.58 nm)
8th layer	α -Si(32.2 nm)	α -Si(32.2 nm)	α -Si(32.2 nm)	α -Si(64.4 nm)
9th layer	SiN(61.78 nm)	SiN(61.58 nm)	SiN(61.58 nm)	SiN(99 nm)
10th layer	α -Si(32.2 nm)	α -Si(32.2 nm)	α -Si(32.2 nm)	α -Si(51.5 nm)
				SiN(99 nm)
				α -Si(51.5 nm)
				SiN(99 nm)
				α -Si(51.5 nm)
				SiN(61.58 nm)
				α -Si(32.2 nm)
				SiN(61.58 nm)
				α -Si(32.2 nm)

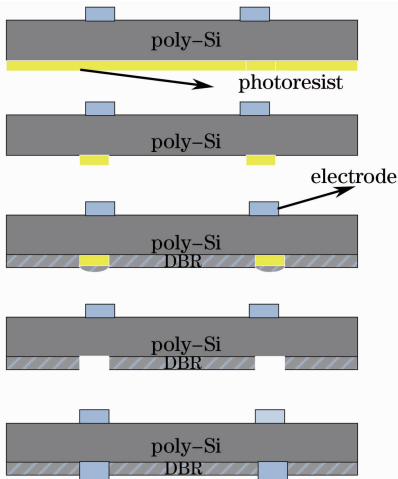


图 4 光刻剥离工艺流程
Fig. 4 Lift-off process

4.4 IDBR 反射率测量与偏差讨论

图 6 表示 IDBR 结构表面反射率随波长的变化关系。可以看出,随着波长从 250 nm 增加, Si 表面的反射率先降低,在 1000 nm 处达到 35%,后随波长增加而不断增加,然后振荡平稳于 55%。重复测量三遍结果发现,测量再现性在 330 nm 处最差,达到 $\pm 3.9\%$, 1280 nm 处也出现峰值, $\pm 1.84\%$, 但总的全波段平均再现性比较低,为 0.568%。在 1000~1200 nm 波段,测量导致的不确定性平均值 0.53%,说明在 1000~1200 nm 波段,测量导致的不确定度

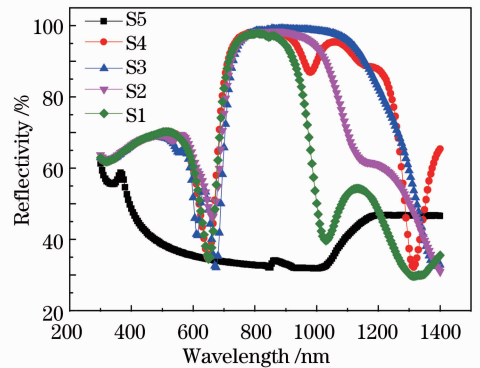


图 5 IDBR 前面反射率测量结果
Fig. 5 Measured result of front reflectivity of IDBR

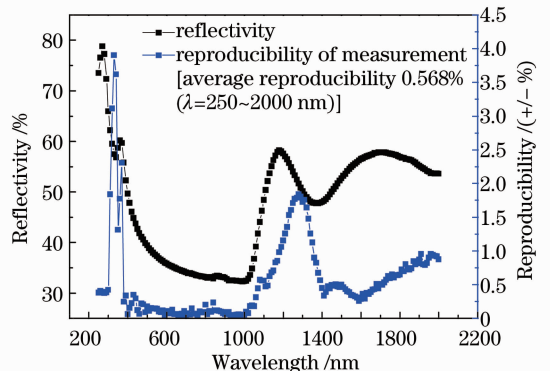


图 6 IDBR 结构表面反射率随波长的变化关系
Fig. 6 Reflectivity versus wavelength of IDBR

相当小,比起由于 IDBR 结构变化导致的反射率变化,该量为小量,可以忽略不计。IDBR 反射率随波长变化关系的多次测量结果(再现性)如图 7 所示。

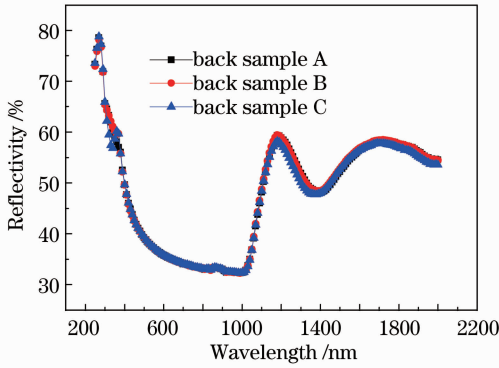


图 7 IDBR 反射率随波长变化关系的多次测量结果
Fig. 7 Multiple measurement results of IDBR reflectivity versus wavelength

由图 8 可以看出,在 1000~1200 nm 波长范围内,具有高达 30% 的透射率,而且对比发现,在该波段,双面电池背表面的光谱响应依然较高,平均相对光谱响应达到 0.5 左右,说明红外波段存在较多漏光,这将成为导致电池效率下降的重要因素之一。

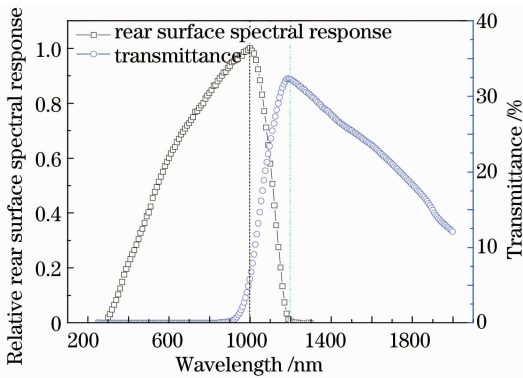


图 8 双面电池背表面的相对光谱响应与电池的透射率随波长的变化关系

Fig. 8 Double-side solar cell spectral response and transmittance versus wavelength

图 9 表示 IDBR 背表面反射率的测试结果。back sample 1 表示中心波长为 500 nm($\times 2$ 对)+800 nm($\times 3$ 对)的 IDBR 结构表面的反射率;back sample 2 表示中心波长为 500 nm($\times 2$ 对)+900 nm($\times 3$ 对)的 IDBR 结构表面的反射率;back sample 3 表示中心波长为 500 nm($\times 2$ 对)+1000 nm($\times 3$ 对)的 IDBR 结构表面的反射率;back sample 4 表示中心波长为 500 nm($\times 2$ 对)+800 nm($\times 3$ 对)+1000 nm($\times 4$ 对)的 IDBR 结构表面的反射率;back sample 5 表示未沉积 IDBR 薄膜的 Si 片表面的反射率。

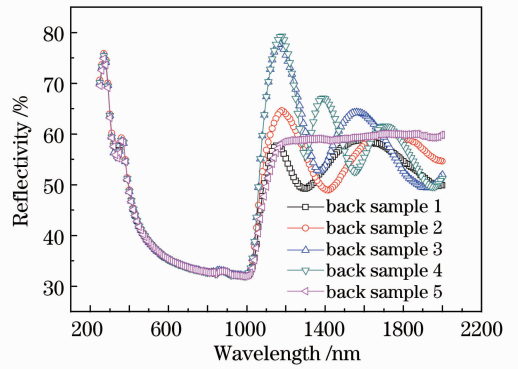


图 9 IDBR 背表面反射率的测试结果

Fig. 9 Measured result of backside reflectivity of IDBR

如图 9 所示,1000 nm 以上波段范围内, Si 片(sample 5)表面反射率几乎不变(反射率约为 60%),而 IDBR 结构(sample 4)却表现出明显的波动性,且随着第二中心波长的上移,在 1000~1200 nm 红外波长范围内的反射明显增强, sample 3 和 sample 4 的表面反射增强最为明显,这说明,通过调节 IDBR 结构,可以明显增强 1000~1200 nm 波段红外光反射,提高其在电池中的传播光程,有效增强红外光在 HIT 电池中的吸收概率。图 10 表示带有 DBR 结构的双面太阳能电池结构。

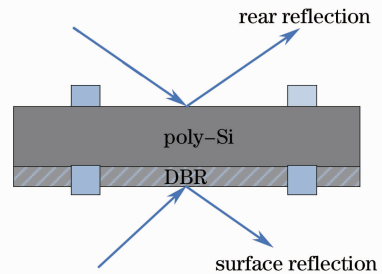


图 10 带有 DBR 结构的双面太阳能电池结构

Fig. 10 Structure of double-side solar cell with DBR

5 结 论

通过优化设计 4 种不同中心波长组合的异型布拉格背反射结构,发现 S3[中心波长为(500+1000) nm]具有最佳宽频带高反射效果,该异质结由两对非晶硅(32 nm)/氮化硅(61.78 nm) DBR 结构与三对非晶硅(64 nm)/氮化硅(123.57 nm) DBR 结构组成。该异型布拉格反射镜在 730~1155 nm 的光谱范围内设计反射率达到 90%,在 750~1110 nm 波长范围内的平均反射率高达 95%,从而具有显著提高太阳能电池的宽谱吸收效率的潜力,可以对 1000~1155 nm 范围内的红外光进行有效反射,增强电池对红外波段的吸收。

参 考 文 献

- 1 F Duerinckx, I K Filipek, K V Nieuwenhuysen, *et al.*. Simulation and implementation of a porous silicon reflector for epitaxial silicon solar cells[J]. Prog Photovolt: Res Appl, 2008, 16(5): 399-407.
- 2 M Ghannam, A Abouelsaood, I Kuzma, *et al.*. Optical modeling of capped multi-layer porous silicon as a back reflector in thin-film solar cells[C]. Proceedings of the IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2006. 1362-1364.
- 3 Zhou Zhou, Zhou Jian, Sun Xaiowei, *et al.*. Design of an irregularly shaped DBR for thin film solar cells [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0731002.
周 舟, 周 健, 孙晓玮, 等. 薄膜太阳能电池异型布拉格背反射结构设计[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0731002.
- 4 Lu Baowen, Xu Xueke, Yu Xiang, *et al.*. Optical properties and structures of silver thin films deposited by thermal evaporation with different deposition rate [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 283-286.
卢宝文, 徐学科, 余 祥, 等. 不同沉积速率下热蒸发银膜的光学性能和结构分析[J]. 光学学报, 2010, 30(1): 283-286.
- 5 Z C Holman, M Filipić, A Descoedres, *et al.*. Infrared light management in high-efficiency silicon heterojunction and rear-passivated solar cells [J]. J Appl Phys, 2013, 113(1): 013107.
- 6 M Mansuripur, G A Neville Connell, J W Goodman. Laser-induced local heating of multilayers[J]. Appl Opt, 1982, 21(6): 1106-1112.
- 7 Bai Liang, Zhu Jingtao, Xu Jing, *et al.*. Multilayer film reflective mirror at 30.4 nm [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(9): 2615-2618.
白 亮, 朱京涛, 徐 敬, 等. 30.4 nm 波长处 Mg 基多层膜反射镜[J]. 光学学报, 2009, 29(9): 2615-2618.

栏目编辑: 韩 峰