

新型砷化镓太阳电池的宽带减反射膜设计

孙希鹏 肖志斌 杜永超

天津恒电空间电源有限公司, 天津 300384

摘要 针对新型高效叠层砷化镓太阳电池[反向外延生长3结晶格失配太阳电池(IMM-3J)、反向外延生长4结晶格失配太阳电池(IMM-4J)], 提出与其相匹配的四层宽带减反射膜的设计方案。利用电子束热蒸发的减反射膜沉积方式, 在太阳电池表面制备宽带减反射膜。测量蒸镀减反射膜前后电池反射率的变化, 结合外量子效率计算出宽带减反射膜对电池各结短路电流的增益效果。与原有双层减反射膜进行对比, 四层宽带减反射膜具有更宽的减反射区域, 适用于 IMM-3J、IMM-4J 电池。利用 Essential Macleod 软件模拟分析了宽带减反射膜制备过程中的工艺稳定性, 对于膜层的设计作出了进一步的优化。

关键词 薄膜; 减反射膜; 宽带; 太阳电池; 反射率; 外量子效率

中图分类号 O484.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0431002

Design of Broadband Antireflection Coating for New Gallium Arsenide Solar Cell

Sun Xipeng Xiao Zhibin Du Yongchao

Tianjin Hengdian Space Power Co., Ltd., Tianjin 300384, China

Abstract A design of four-layer broadband antireflection coating (ARC) for high efficiency GaAs solar cell [inverted metamorphic 3 junction (IMM-3J), 4 junction (IMM-4J) lattice-mismatch solar cell] is proposed. The broadband antireflection coating is prepared on the solar cell by electron-beam thermal evaporation method. According to the differences of reflectance and external quantum efficiency (EQE) before and after evaporation, the short circuit current gain of each junction is calculated. Compared with the double-layer antireflection coating, the four-layer antireflection coating with a wide anti-reflective area is more appropriate for IMM-3J and IMM-4J solar cell. Process stability of the antireflection coating preparation is analyzed by Essential Macleod software. The related design optimization is also given out.

Key words thin films; antireflection coating; broadband; solar cell; reflectance; external quantum efficiency

OCIS codes 310.1210; 310.4165; 310.6860; 350.6050

1 引言

太阳电池是将光能转化为电能的重要元件, 为了提高转换效率, 其研究重心正在逐步由硅单结太阳电池向砷化镓多结太阳电池转变。目前工艺较为成熟的量产多结电池, 采用正向生长、晶格匹配的结构(InGaP/GaAs/Ge), 平均转换效率最高可达 29.8%(Azurspace)。尚处于研制过程中、转换效率较高的, 是反向外延生长 3 结(IMM-3J)、4 结(IMM-4J)晶格失配太阳电池。IMM-3J 电池的结构为 InGaP/GaAs/InGaAs, 最高转换效率可达 33%; IMM-4J 电池的结构为 InGaP/GaAs/In_{0.5}GaAs/In_{0.5}GaAs, 最高转换效率可超过 34%^[1]。

为了减少阳光照射在电池表面产生的反射损耗, 可以通过表面改性^[2]和制备减反射膜(ARC)^[3]来降低表面反射率。表面改性是通过刻蚀、沉积等手段, 利用物理或化学方法在电池表面制备电介质材料的纳米结构^[4-7], 或者将预制备的新型光学材料, 剥离转移到电池表面^[8]。制备减反射膜是在电池表面沉积一层或多层

收稿日期: 2015-10-09; 收到修改稿日期: 2015-12-06

作者简介: 孙希鹏(1989—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事太阳电池器件工艺及光学薄膜设计方面的研究。

E-mail: tankerxp@163.com

的光学薄膜,通过合理选择膜的折射率与厚度来实现降低反射率的效果。由于表面改性的实现工艺较为复杂,成本昂贵,不适用于批量大尺寸电池的生产,因此量产多结砷化镓电池依旧采用制备减反射膜的方式来降低电池反射率。

InGaP/GaAs/Ge 结构的三结电池,InGaP 结工作波长为 300~650 nm, GaAs 结工作波长为 500~900 nm,这两结的电流密度较为接近;而 Ge 结工作波长为 900~1700 nm,其电流密度比前两结大出许多。考虑到电池的短路电流由串联 PN 结中电流最小的结来决定,因此此类电池采用双层减反射膜体系(TiO_x-Al₂O₃)^[9],将低反射区域定位于 300~900 nm 之间。

新型高效砷化镓电池中,IMM-3J 电池的主要响应波段为 400~1200 nm, IMM-4J 电池为 400~1700 nm。理论上两种电池各结短路电流数值较为一致,为了使电池短路电流足够大,要求配套的减反射膜在电池的响应波段内能实现均匀的减反射。蒸镀原有双层减反射膜后,电池在 1000 nm 后的反射率明显升高,致使 IMM-3J 电池的第 3 结和 IMM-4J 电池的第 4 结对应的波段出现减反射不均匀、蒸镀减反射膜后电流密度不一致的问题。本文针对 IMM-3J、IMM-4J 电池提出了配套的宽带减反射膜的设计,并验证了其实际应用效果。

2 原理设计

文中所有关于减反射膜的设计及结果,均是在入射光从空气中垂直入射的情况下得到的,所有结果同时适用于入射光中的 p 偏振分量和 s 偏振分量,在确定多层膜的特性时,仅考虑入射光在每个界面上的单次反射,并忽略了薄膜自身的吸收作用。另外,所出现的折射率值,不做特殊说明时,均指材料在 600 nm 附近的折射率数值。

入射光在多层光学薄膜的界面上发生反射后,反射率 $R=r^2$, r 是反射光的合成振幅反射系数,由每一层界面的反射系数的矢量和确定^[10]:

$$r = r_1 + r_2 \exp(-2i\delta_1) + r_3 \exp[-2i(\delta_1 + \delta_2)] + r_4 \exp[-2i(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3)] + \dots + r_{j+1} \exp[-2i(\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_j)]. \quad (1)$$

每个界面的振幅反射系数可表示为 $r_j = \frac{n_{j-1} - n_j}{n_{j-1} + n_j}$ ($n_0 = 1$), 光在每层薄膜中传播产生的位相变化为 $\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j$, d_j 为每层膜的物理厚度。量产三结晶格匹配电池采用的是 W 型减反射膜结构设计,要求每一

层的振幅反射系数相等,因此折射率有: $\frac{n_1}{n_0} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{n_s}{n_2}$ (n_s 为衬底折射率)。同时每层膜中的位相变化

$\delta_1 = \delta_2 = \frac{\pi}{2}$, $n_1 d_1 = n_2 d_2 = \frac{\lambda_0}{4}$ (λ_0 为参考波长),此时 r 在 $\lambda_1 = \frac{3}{2}\lambda_0$ 和 $\lambda_2 = \frac{3}{4}\lambda_0$ 的两波长处为 0(矢量图如图 1 所示),得到反射率的极小值。由于太阳电池衬底材料折射率在 3.6 左右,因此选择折射率为 2.29 的 TiO_x 和 1.59 的 Al₂O₃ 作为双层减反射膜材料。当选取参考波长为 530 nm 时, TiO_x 和 Al₂O₃ 的厚度分别为 57 nm 和 83 nm; 两处反射率极小值出现在 400 nm 和 800 nm 左右,即三结电池的前两个 PN 结的位置。

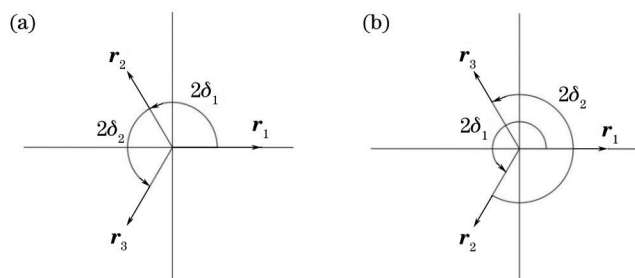


图 1 双层膜振幅反射系数矢量图。(a) $\lambda_1 = \frac{3}{2}\lambda_0$; (b) $\lambda_2 = \frac{3}{4}\lambda_0$

Fig.1 Bilinear amplitude reflection coefficient vector. (a) $\lambda_1 = \frac{3}{2}\lambda_0$; (b) $\lambda_2 = \frac{3}{4}\lambda_0$

但若要获得更宽的低反射区域,实现起来将非常困难。因为低反射区域的展宽,将要伴随着膜层数量的增加,以四层为例,对折射率的匹配要求就变为: $\frac{n_1}{n_0} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{n_3}{n_2} = \frac{n_4}{n_3} = \frac{n_s}{n_4}$ 。常见的光学薄膜材料的折射率很

难超过 2.5,无法实现上述的膜层搭配^[11]。

根据 Willey 的经验公式^[12],可以估算宽带减反射膜的最低反射率平均值:

$$R_{ave} = (4.378/D)(1/T)^{0.31}[\exp(B - 1.4) - 1](L - 1)^{3.5}, \quad (2)$$

式中 D 是除最外层膜的膜层高低折射率差值; T 是薄膜总光学厚度与低反射区域中值波长的比值; B 是低反射区域带宽,即 $\lambda_{max}/\lambda_{min}$; L 是最外层膜折射率。因此对于固定的低反射区域, D 越大, L 越小,平均反射率越低。考虑到薄膜的牢固度,提出四层宽带减反射膜选用 $\text{TiO}_2(2.29)$ 和 $\text{SiO}_2(1.45)$ 作为内层膜,选用低折射率 $\text{SiO}_2(1.19)$ 作为最外层膜。

固定膜层折射率后,将物理厚度作为设计参数,利用 Macleod 软件进行优化。Baumeister^[11,13]曾提出构建宽带减反射膜初始结构的原则:中心波长取 $\lambda_0 = \frac{2}{1/\lambda_{max} + 1/\lambda_{min}}$,最外层低折射率材料的光学厚度为 $\frac{\lambda_0}{4}$,其余膜层为高低折射率交替结构。因此将膜层初始厚度设计为 Base|0.8H0.4L0.4HL|Air。计算反射率时,利用光学薄膜特征矩阵

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left[\prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{n_j} \sin \delta_j \\ in_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \right] \begin{bmatrix} n_0 \\ n_s \end{bmatrix}, \quad (3)$$

得到各波长下 k 层薄膜的组合导纳 $Y = C/B$,薄膜的总反射率为 $R = \left(\frac{n_0 - Y}{n_0 + Y} \right)^2$,该结果由软件计算得出。表 1 和表 2 给出了 Macleod 软件优化后的 IMM-3J、IMM-4J 太阳能电池四层宽带减反射膜设计。

表 1 IMM-3J 电池减反射膜设计(4ARC)

Table 1 Design of antireflection coating for IMM-3J solar cell (4ARC)

Layer	Air	SiO_2	TiO_2	SiO_2	TiO_2	Solar cell
Refractive index (600 nm)	1.0	1.19	2.29	1.45	2.29	
Thickness /nm		136	14	45	56	

表 2 IMM-4J 电池减反射膜设计(4ARC)

Table 2 Design of antireflection coating for IMM-4J solar cell (4ARC)

Layer	Air	SiO_2	TiO_2	SiO_2	TiO_2	Solar cell
Refractive index (600 nm)	1.0	1.19	2.29	1.45	2.29	
Thickness /nm		157	11	49	63	

设计中的低折射率 SiO_2 是利用高真空光学镀膜机,以大角度沉积的方式获得的,利用 Semilab 公司的 GES-5E 光谱椭偏仪测量相应的折射率曲线,如图 2 所示。

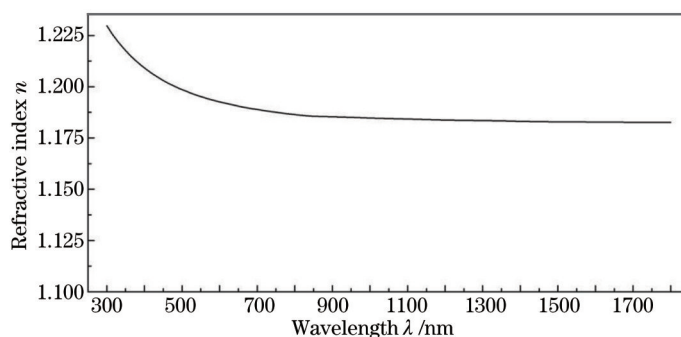


图 2 SiO_2 折射率曲线

Fig.2 Refractive index curve of SiO_2

图 3 分别给出了利用 Macleod 软件模拟得到的 IMM-3J 电池(衬底结构 $\text{InGaP}/\text{GaAs}/\text{InGaAs}$)、IMM-4J 电池(衬底结构 $\text{InGaP}/\text{GaAs}/\text{In}_x\text{GaAs}/\text{In}_y\text{GaAs}$)搭配双层、四层减反射膜后的反射率曲线。四层减反射膜在长波区域的减反射效果是明显优于双层减反射膜的。

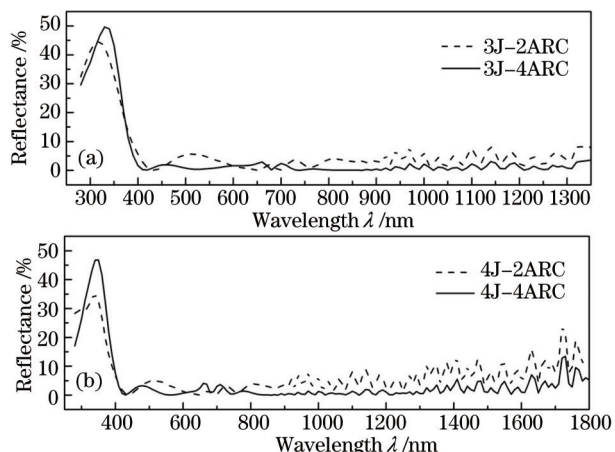


图3 (a) IMM-3J和(b) IMM-4J电池减反射膜反射率模拟曲线

Fig.3 Simulated reflective curves of ARC for (a) IMM-3J and (b) IMM-4J solar cell

3 实验方法

减反射膜材料均为光学薄膜材料,基底是太阳能电池;为了避免对太阳电池中的PN结造成结构损伤,沉积减反射膜时,没有使用磁控溅射或是离子源辅助的沉积方式,而是采用电子束热蒸发的方式。主要设备为南光高真空镀膜机,采用晶振膜厚控制系统来监控膜厚。

在沉积过程中,膜料的沉积角度(图4中的 α 角)直接影响薄膜的光学参数。真空室内真空度达 10^{-3} Pa时开始沉积,前3层薄膜采用常规制备工艺,基板温度为 $220\text{ }^{\circ}\text{C}$,沉积角度约为 10° 。最外层的低折射率 SiO_2 是在室温下沉积的^[14],同时增加沉积角 α 至 75° 。 α 角越大,材料的填充密度越小,薄膜的孔隙度 f 越大^[15]。孔隙度 f 与薄膜的有效折射率 n 有如下关系: $n = f \cdot n_i + (1 - f) \cdot n_s$ 。其中 n_i 为空气孔隙折射率, n_s 为固体部分折射率。膜层厚度参照前文所述的设计厚度,误差为 $\pm 3\%$ 。

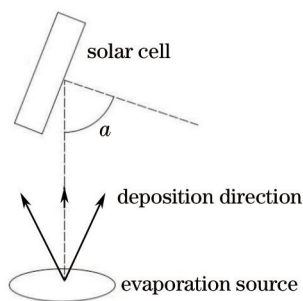


图4 大角度沉积装置示意图

Fig.4 Schematic diagram of the large angle deposition

4 实验结果

在IMM-3J、IMM-4J电池表面,分别蒸镀双层、四层减反射膜,蒸镀减反射膜前后电池的反射率曲线如图5所示,响应波段内平均反射率如表3所示。反射率是利用Varian公司生产的Cary5000紫外-可见-红外分光光度计测量得到的,选用积分球测试部件,双光束模式测量。在反射率曲线图中, $800\sim 850\text{ nm}$ 处出现反射率的密集变化,是由于仪器在此波长处开始切换探测器和光栅所造成的。该仪器在近红外区域使用的是硫化铅探测器,在紫外和可见区域使用光电倍增管探测器。

需要说明的是,IMM-3J、IMM-4J电池反射率分别在 1200 nm 和 1700 nm 后出现激增,是由电池自身的结构所决定的。多结电池的有效外延层仅有十几微米,其下方是砷化镓衬底及金属键合层。由于衬底及键合层部分不存在PN结结构,不会像外延层中的PN结一样吸收光线,同时金属键合层对近红外和红外波段又有很高的反射率,因此电池对其工作波长以外的光线表现出高反射效果,此效果在图中虚线表示的未蒸减

反射膜电池上亦有体现。

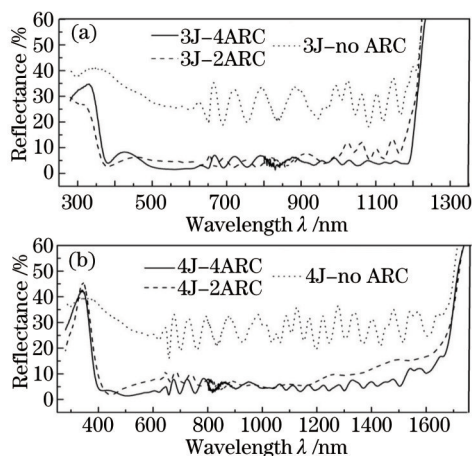


图5 (a) IMM-3J和(b) IMM-4J电池蒸镀双层、四层减反射膜前后反射率曲线

Fig.5 Measured reflective curves of two-layer and four-layer ARC deposition for (a) IMM-3J and (b) IMM-4J solar cell

表3 IMM-3J、IMM-4J电池样品平均反射率

Table 3 Average reflectance of IMM-3J and IMM-4J solar cell sample

Sample	Response wavelength	Average reflectance		
		no ARC	2 ARC	4 ARC
IMM-3J solar cell	400~1200 nm	27.60%	6.17%	4.10%
IMM-4J solar cell	400~1700 nm	28.13%	9.16%	6.11%

5 分析与讨论

5.1 宽带减反射膜的减反射效果分析

对比图3和图5发现,实际制备的减反射膜反射率与软件模拟结果十分相近,四层宽带减反射膜在1000 nm后(IMM-3J)、1200 nm后(IMM-4J)的减反射效果均优于双层减反射膜。为了分析减反射膜对电池短路电流的影响,利用图5中蒸减反射膜前后电池样品的反射率数据以及图6中给出的电池样品初始外量子效率(EQE),计算出蒸镀减反射膜后电池各结的EQE,再根据AM1.5G光谱分布,计算出各结的短路电流,结果如表4所示。

表4 蒸镀双层、四层减反射膜后 IMM-3J、IMM-4J 电池各结短路电流变化

Table 4 Short current gain of each junction after two-layer and four-layer ARC deposition for IMM-3J and IMM-4J solar cell

Junction	Wavelength /nm	IMM-3J short current I (mA/cm ²)(AM1.5G)			IMM-4J short current I (mA/cm ²)(AM1.5G)				
		Before ARC	After ARC	Gain	Before ARC	After ARC	Gain		
1	300~750	10.650	4ARC	14.206	33.4%	9.098	4ARC	12.118	33.2%
			2ARC	13.980	31.3%		2ARC	11.713	28.7%
2	500~950	11.638	4ARC	15.147	30.2%	11.500	4ARC	14.757	28.3%
			2ARC	15.123	29.9%		2ARC	14.466	25.8%
3	800~1300	10.476	4ARC	13.906	32.7%	9.744	4ARC	12.639	29.7%
			2ARC	13.218	26.2%		2ARC	12.555	28.8%
4	1150~1800	none				7.038	4ARC	9.015	28.1%
							2ARC	8.559	21.6%

电池的EQE是利用Enlitech生产的QE-R太阳能电池光谱响应测试系统测量的。单色仪发出功率为 $P(\lambda)$ 的单色光照射到电池表面,产生光电流 $I(\lambda)$,得到电池的光谱响应 $S_r(\lambda) = I(\lambda)/P(\lambda)$,利用 $E_{QE}(\lambda) = \frac{hc}{q\lambda} S_r(\lambda)$ 得到电池在该波长下的EQE,其中 h 是普朗克常量, c 是光速, q 是电子电量。测量多结电池每一结的EQE时,需要施加补偿光来确保其他各结的电流平衡。忽略减反射膜的吸收作用,蒸膜后的EQE可表示为

$E_{QE}'(\lambda) = E_{QE}(\lambda) \left[\frac{1 - R'(\lambda)}{1 - R(\lambda)} \right]$, 其中 $R(\lambda)$ 和 $R'(\lambda)$ 分别对应蒸膜前后各波长下的反射率。

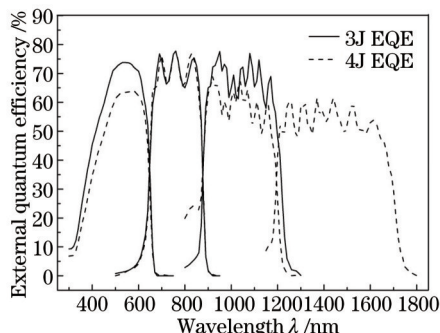


图6 蒸镀减反射膜前IMM-3J、IMM-4J电池外量子效率

Fig.6 EQE of IMM-3J、IMM-4J solar cell before ARC deposition

从结果中可以发现,四层减反射膜对于IMM-3J电池第3结、IMM-4J电池第4结的电流增益是明显高于双层减反射膜的。由于上述两个结分别是对应电池样品的限流结,因此对于此类电池,十分有必要利用四层减反射膜替换原有的双层减反射膜。由于电池外延工艺的差异,不同批次间电池的限流结位置也会略有不同;但无论限流结的位置在何处,上述结果均表明四层减反射膜比双层减反射膜有着更宽的低反射区域,该设计将更加适用于需要实现宽带减反射效果的电池样品。

5.2 宽带减反射膜的工艺稳定性分析

四层减反射膜比双层减反射膜的制备工艺更为复杂,以表2中IMM-4J的减反射膜设计为例进行分析。实验中使用的高真空镀膜设备在进行电子束热蒸发过程中产生的膜厚误差约为±3%,利用Macleod软件模拟膜厚误差对反射率的影响,得到如图7所示的结果。在误差范围内,四层减反射膜的反射率未出现大幅波动;在长波波段出现干涉峰峰位的细微移动,对实际的减反射效果影响很小;因此四层减反射膜的制备具有较高的可控性和稳定性。

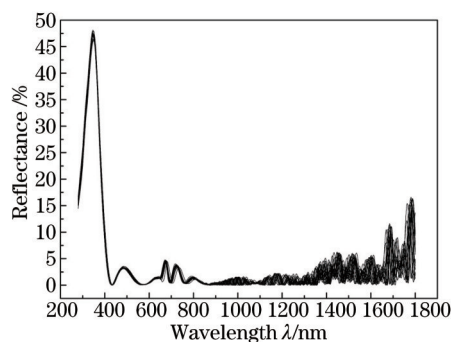


图7 四层减反射膜膜厚误差分析曲线

Fig.7 Error analysis curve of the film thickness for four-layer ARC

5.3 宽带减反射膜的优化设计

图5表明,蒸镀四层减反射膜后,电池主要响应波段内的反射率均有明显下降,但在300~400 nm的短波区域及电池响应的截止波长处的反射率依旧很高。截止波长处反射率受电池结构的影响,难以通过蒸镀减反射膜使其有更明显的下降。对于短波区域,希望通过优化减反射膜的设计,使其减反射区域覆盖到300 nm。同样是参照原理设计中宽带减反射膜的设计原则,以 $\langle LH \rangle^n$ 作为初始结构,针对IMM-4J电池模型,提出的优化设计如表5和表6所示,模拟得到的反射率曲线如图8所示。

在表5的六层膜设计中引入了另一种材料 Al_2O_3 ,目的是在300~400 nm区域增加一个减反射中心,在长波波段的减反射效果与原四层膜没有明显差异。在表6的十层膜设计中,300~1800 nm波段内的反射率有了整体下降。随着膜层数量的增加,减反射膜的制备难度和不稳定性会增大,而反射率的下降程度却变得

越来越小。同时,十层膜模拟结果中厚度为6 nm的TiO₂在实际的制备过程中折射率是很难达到2.29的,因此虽然十层膜能够实现更低的反射率,但考虑到实际生产过程中膜层制备的可行性和稳定性,减反射膜的层数应控制在6层以内。有关宽带减反射膜优化设计的实验工作,将在日后研究中作进一步探索。

表5 IMM-4J电池减反射膜优化设计(6ARC)

Table 5 Optimized design of ARC for IMM-4J solar cell (6ARC)

Layer	Air	SiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	TiO ₂	Solar cell
Refractive index (600 nm)	1.0	1.19	1.45	1.59	2.29	1.45	2.29	
Thickness/nm		78	55	56	14	11	49	

表6 IMM-4J电池减反射膜优化设计(10ARC)

Table 6 Optimized design of ARC for IMM-4J solar cell (10ARC)

Layer	Air	SiO ₂	TiO ₂	SiO ₂	TiO ₂	SiO ₂	TiO ₂	SiO ₂	TiO ₂	SiO ₂	TiO ₂	Solar cell
Refractive index (600 nm)	1.0	1.19	2.29	1.19	2.29	1.45	2.29	1.45	2.29	1.45	2.29	
Thickness /nm		107	6	60	6	61	13	29	27	11	58	

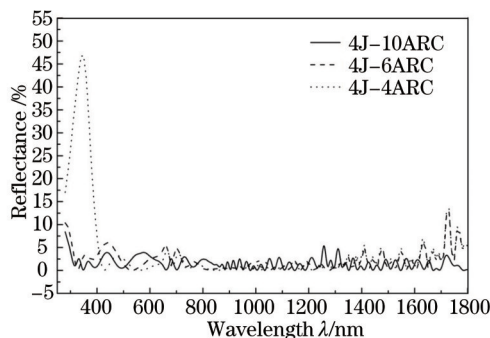


图8 IMM-4J电池减反射膜优化设计反射率模拟曲线

Fig.8 Simulated reflective curves of ARC optimized design for IMM-4J solar cell

6 结 论

针对新型高效太阳电池提出了四层宽带减反射膜的设计,利用电子束热蒸发在IMM-3J、IMM-4J电池表面制备四层减反射膜并与双层膜进行对比。在参考波段内,四层减反射膜比双层减反射膜有着更低的平均反射率,对于IMM-3J、IMM-4J电池有着较大的实用价值。四层宽带减反射膜具有较好的工艺稳定性,针对短波区域内减反射效果的增强提出了相关的优化设计。

参 考 文 献

- 1 Sun L, Zhang M, Fang X, *et al.*. Recent progress of high-efficiency III-V multi-junction solar cells[C]. Photovoltaic Specialists Conference, 2013: 2832-2834.
- 2 Wang Ligu, Zhao Zhenyue, Zhang Xiaodan, *et al.*. Optimization of light trapping structure on textured silicon substrate for heterojunction solar cells[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0216001.
王利果, 赵振越, 张晓丹, 等. 异质结太阳电池硅衬底绒面陷光结构的优化[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0216001.
- 3 Jung S M, Kim Y H, Kim S I, *et al.*. Design and fabrication of multi-layer antireflection coating for III-V solar cell[J]. Current Applied Physics, 2011, 11(3): 538-541.
- 4 Cui H, Pillai S, Campbell P, *et al.*. A novel silver nanoparticle assisted texture as broadband antireflection coating for solar cell applications [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2013, 109: 233-239.
- 5 Diedenhofen S L, Grzela G, Haverkamp E, *et al.*. Broadband and omnidirectional anti-reflection layer for III/V multi-junction solar cells [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2012, 101: 308-314.
- 6 Hou J L, Chang S J, Hsueh T J, *et al.*. InGaP/GaAs/Ge triple-junction solar cells with ZnO nanowires[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2013, 21(8): 1645-1652.

- 7 Lü Xiaozhan, Ji Lingfei, Wu Yan, *et al.*. Fabrication of high performance anti-reflection silicon surface by picosecond laser scanning irradiation with chemical corrosion[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0403006.
吕晓占, 季凌飞, 吴 燕, 等. 皮秒激光-化学复合法制备高效减反射晶硅表面微结构研究[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0403006.
- 8 Ha D, Fang Z, Hu L, *et al.*. Paper-based anti-reflection coatings for photovoltaics[J]. Advanced Energy Materials, 2014, 4(9): 1301804.
- 9 Liu Hanying, Liu Chunming, Xiao Zhibin, *et al.*. Optical thin films for space solar cells[J]. Optical Instruments, 2006, 28(4): 164-167.
刘汉英, 刘春明, 肖志斌, 等. 空间太阳能电池用光学薄膜[J]. 光学仪器, 2006, 28(4): 164-167.
- 10 Tang Jinfa, Gu Peifu. Modern optical thin film technology[M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 2006: 61-66.
唐晋发, 顾培夫. 现代光学薄膜技术[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 2006: 61-66.
- 11 Baumeister P. Starting designs for the computer optimization of optical coatings[J]. Applied Optics, 1995, 34(22): 4835-4843.
- 12 R R Willey. Predicting achievable design performance of broadband antireflection coatings[J]. Applied Optics, 1993, 32(28): 5447-5451.
- 13 Zheng Zhenrong, Gu Peifu, Chen Haixing, *et al.*. Design and preparation of super broadband antireflection coating[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(7): 2026-2029.
郑臻荣, 顾培夫, 陈海星, 等. 超宽带减反射膜的设计和制备[J]. 光学学报, 2009, 29(7): 2026-2029.
- 14 Du Qianqian, Wang Wenjun, Li Shuhong, *et al.*. Influence of substrate temperature on SiO₂ thin films by electron beam deposition[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1007002.
杜倩倩, 王文军, 李淑红, 等. 基底温度对电子束沉积 SiO₂ 薄膜的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1007002.
- 15 Kennedy S R, Brett M J. Porous broadband antireflection coating by glancing angle deposition[J]. Applied Optics, 2003, 42(22): 4573-4579.

栏目编辑: 韩 峰