

基于纳米孔阵列增透膜的光伏器件特性分析及实验研究*

王宁 朱永[†] 韦玮 陈建君 李平 文玉梅

(重庆大学光电工程学院, 光电技术及系统教育部重点实验室 重庆 400044)

(2011年4月7日收到; 2011年5月16日收到修改稿)

利用严格耦合波理论分析了纳米孔阵列薄膜的光学特性, 提出将纳米孔阵列薄膜作为光伏器件增透膜来提高器件的光吸收和转换效率. 理论分析表明: 纳米孔阵列薄膜比单层增透膜有更好的增透效果, 能够更好地提高光伏器件的转换效率, 在 400 nm—600 nm 波段尤为显著. 纳米孔阵列薄膜的最优结构参数: 周期为 500 nm, 填充率为 0.2, 厚度为 110 nm. 采用微纳加工技术, 在 $\Phi 200 \mu\text{m}$ Si 探测器的增透膜上制作了不同周期的纳米孔阵列, 并搭建了相应的测试系统. 实验结果表明: 周期为 500 nm 时器件的性能提高最为明显, 短路电流在 400 nm—1100 nm 波段提高约为 6%, 在 400 nm—600 nm 波段提高约为 15%; 开路电压提高约为 2%. 纳米孔阵列薄膜能够很好地提高光伏器件的转换效率.

关键词: 纳米孔阵列, 严格耦合波理论, 增透膜, 光伏器件

PACS: 88.40.hj, 79.60.Jv, 78.20.Bh

1 引言

由于 Si 材料具有低成本、储藏丰富、无毒性、稳定性以及加工工艺成熟等优点, 使其成为制作光伏器件的最好选择^[1]. 目前商用的光伏器件通常具有 200—300 μm 的 Si 有源层, 约占光伏器件成本的 40%, 对于大范围的应用, 成本非常高. 为了降低大范围应用的成本, 研究人员提出了 Si 有源层仅几微米的薄膜太阳能电池, 但是有源层越薄光伏器件的光吸收就越弱, 从而导致光伏器件转换效率降低, 因此如何提高器件的光吸收就成为了光伏器件的研究热点. 提高光伏器件光吸收的主要途径是改变器件表面结构和有源层结构. Walheim 等^[2] 首先提出使用纳米结构改变增透膜等效折射率来改善增透膜的光学特性, 提高了增透膜的透射效果. Nayfeh 等^[3] 利用 Si 纳米颗粒的光转换特性, 将 Si 纳米颗粒涂敷在光伏器件表面从而提高了器件对紫外和可见光的吸收和转换效率. 国内外研究人员也利用金属表面传播的等离子波^[4] 在光伏器件的表

面涂敷 Au、Ag 等离子体颗粒提高了器件的光吸收^[5-7]. Chen 等提出使用纳米线阵列^[8] 和纳米孔阵列^[9] 来制作太阳能电池的方法, 并进行了理论和实验研究, 结果表明纳米线阵列和纳米孔阵列太阳能电池有很高的转换效率. 由于黑 Si^[10,11] 具有很好的宽谱带光吸收效果, 因此也引起了国内外学者的关注. 纳米线、纳米孔和黑 Si 在提高 Si 吸收效率的同时, 改变了 Si 的物理结构和能带结构, 对载流子的运动有一定的影响, 因而器件的性能并未达到最优化. 此外, 表面微结构在提高器件光吸收的同时, 其制作方法和现有光伏器件的加工工艺差别较大, 从而限制了这些方法的使用范围. 因此在提高光伏器件的光吸收方面还有很大的研究空间. 本文提出利用纳米孔阵列薄膜作为光伏器件增透膜的方法来提高光伏器件的光吸收和转换效率, 该方法不改变有源层的性质, 不仅能提高光伏器件的转换效率, 而且与现有光伏器件的加工相兼容.

本文首先利用严格耦合波^[12-14] (rigorous coupled wave, RCW) 理论分析了纳米孔阵列薄膜的光

* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 50830202) 和国家自然科学基金 (批准号: 60707010) 资助的课题.

[†] E-mail: yongzhu@cqu.edu.cn

学特性, 计算比较了纳米孔阵列增透膜光伏器件和单层 Si_3N_4 增透膜光伏器件的光吸收特性和转换效率, 并对纳米孔阵列的结构进行了优化,

最后加工了不同周期的纳米孔阵列, 通过实验验证了纳米孔阵列增透膜对光伏器件转换效率的提高.

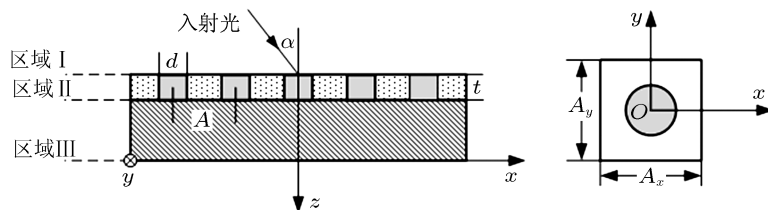


图1 纳米孔阵列薄膜结构

2 理论分析

纳米孔阵列薄膜的结构如图 1 所示, 纳米孔阵列薄膜由薄膜介质和圆柱孔阵列构成, 圆柱孔阵列的结构为纳米量级, 圆柱孔介质为空气 (折射率 $n = 1$). 圆柱孔在 x 方向上的周期为 Δ_x , 在 y 方向上的周期为 Δ_y , 且 $\Delta_x = \Delta_y = \Delta$, 孔的高度为 t , 入射介质层 (区域 I) 和衬底层 (区域 III) 的介电常数分别为 ε_I 和 ε_{III} . 纳米孔阵列由薄膜介质和阵列介质交替构成, 介电常数具有周期性, $\varepsilon = \varepsilon(x + \Delta_x, y + \Delta_y)$. 计算一个波矢为 $k(\alpha, \beta)$ 、偏振角为 θ 的平面波入射纳米孔阵列薄膜的情况, 其中 α 为波矢与 z 轴的夹角, 称为入射角; β 为入射光平面与 xoz 平面的夹角, 称为方位角; 偏振角 θ 是电场矢量与入射光平面的夹角.

为了简化计算将圆孔分割为矩形孔的组合, 圆的矩形孔分割如图 2 所示.

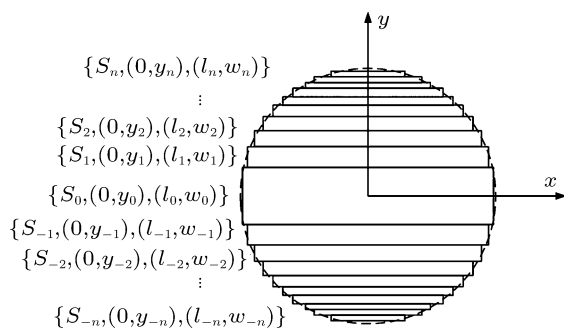


图2 圆孔的分解

$\{S_n, (0, y_n), (l_n, w_n)\}$ 表示圆孔的分割参数, 其中, S_n 表示分解块的编号, 从 $S_0 \cdots S_n$; $(0, y_n)$ 为分解块的中心坐标; l_n 表示分解块在 x 方向的长度, w_n 表示分解块在 y 方向的宽度且 $l_0 > l_1 > \cdots > l_n, w_0 > w_1 > \cdots > w_n$. 因此圆柱阵列的介电常数可表示为

$$\varepsilon(x, y) = \sum_{u=-\infty}^{+\infty} \sum_{v=-\infty}^{+\infty} \varepsilon(u, v) \times \exp \left[j \left(\frac{2\pi ux}{\Delta} + \frac{2\pi vy}{\Delta} \right) \right], \quad (1)$$

$\varepsilon(u, v)$ 为 $\varepsilon(x, y)$ 的 Fourier 变换, 为各个矩形孔 Fourier 变换的叠加. 利用 RCWA 可以推导出纳米孔阵列增透膜的反射率 η_{Rmn} 和透射率 η_{Tmn} ,^[15-17] 如 (2) 式所示:

$$\begin{aligned} \eta_{Rmn} &= |R_{s,mn}|^2 \operatorname{Re} \left(\frac{k_{Izmn}}{\mathbf{k}_0 n_I \cos \alpha} \right) \\ &\quad + |R_{p,mn}|^2 \operatorname{Re} \left(\frac{k_{Izmn}/n_I^2}{\mathbf{k}_0 n_I \cos \alpha} \right), \\ \eta_{Tmn} &= |T_{s,mn}|^2 \operatorname{Re} \left(\frac{k_{IIIzmn}}{\mathbf{k}_0 n_I \cos \alpha} \right) \\ &\quad + |T_{p,mn}|^2 \operatorname{Re} \left(\frac{k_{IIIzmn}/n_{III}^2}{\mathbf{k}_0 n_I \cos \alpha} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $R_{s,mn}$, $R_{p,mn}$, $T_{s,mn}$ 和 $T_{p,mn}$ 分别为反射矩阵和透射矩阵的元素. \mathbf{k}_0 代表真空中的波矢, k_{Izmn} , k_{IIIzmn} 分别定义为

$$\begin{aligned} k_{szmn} &= \begin{cases} [(\mathbf{k}_0 n_s)^2 - k_{xm}^2 - k_{yn}^2]^{\frac{1}{2}} & (\mathbf{k}_0 n_s)^2 > k_{xm}^2 + k_{yn}^2 \\ -j[k_{xm}^2 + k_{yn}^2 - (\mathbf{k}_0 n_s)^2]^{\frac{1}{2}} & (\mathbf{k}_0 n_s)^2 < k_{xm}^2 + k_{yn}^2 \end{cases}, \quad s = \text{I, III} \\ k_{xm} &= \mathbf{k}_0 \left(n_I \sin \alpha \cos \beta - \frac{m \lambda_0}{\Delta} \right), \quad k_{yn} = \mathbf{k}_0 \left(n_I \sin \alpha \cos \beta - \frac{n \lambda_0}{\Delta} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

为了比较单层膜和纳米孔阵列薄膜的增透效果,假定入射光垂直薄膜的表面,且为 TE 波入射,即 $\alpha = 0, \beta = 0, \theta = 90^\circ$. 同时薄膜的材料为 Si_3N_4 , 其厚度为 90 nm, 纳米孔的直径 $d = 360$ nm, 周期 $\Lambda = 500$ nm, 定义纳米孔的填充率 $f = \pi d^2/4\Lambda^2$, 衬底层为硅. 材料的光学参数由参考文献 [18] 查得, 计算结果如图 3 所示:

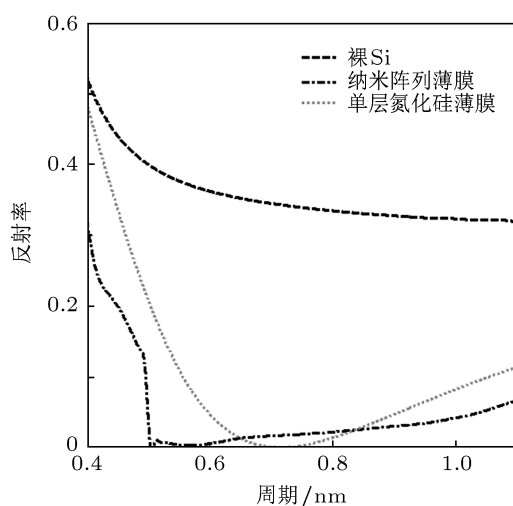


图3 单层增透膜和纳米孔阵列增透膜反射率比较

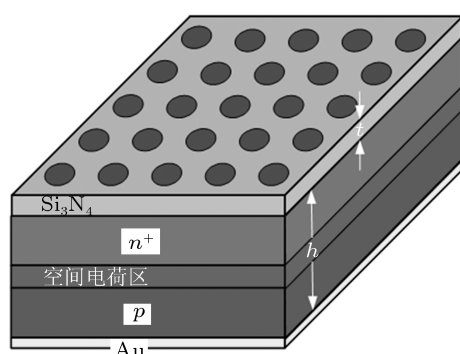


图4 太阳能电池计算模型

由图 3 可知, 裸 Si 表面对入射光的反射率很强, 约有 30% 的入射光被反射; 单层 Si_3N_4 增透膜能有效降低入射光的反射, 平均反射率小于 15%; 纳米孔阵列增透膜同样能有效降低光的反射率, 且平均反射率小于 10%. 由此可见纳米孔阵列薄膜的增透效果优于单层增透膜的增透效果, 选用纳米孔阵列薄膜作为太阳能电池的增透膜能够降低太阳能电池表面的光反射, 提高太阳能电池的光吸收.

3 纳米孔阵列增透膜太阳能电池光学特性数值计算及结构优化

纳米孔阵列增透膜太阳能电池的计算模型如图 4 所示, 表面为纳米孔阵列增透膜, 其特征参数为: 孔的直径 d , x, y 方向的周期相同均为 Λ , 厚度为 t ; 纳米孔阵列增透膜的下层为掺杂 Si 层, 总的厚度为 h ; 底层为 Au 反射层, 厚度为 l .

3.1 器件光吸收计算

假定纳米孔的直径 $d = 360$ nm, 周期 $\Lambda = 500$ nm, 填充率 $f = 0.4$, 厚度 $t = 90$ nm, 掺杂 Si 层的厚度 $h = 2 \mu\text{m}$, Au 反射层的厚度 $l = 500$ nm, 入射光角度 $\alpha = 0, \beta = 0, \theta = 90^\circ$ 为 TE 波入射, 具体计算结果如图 5 所示.

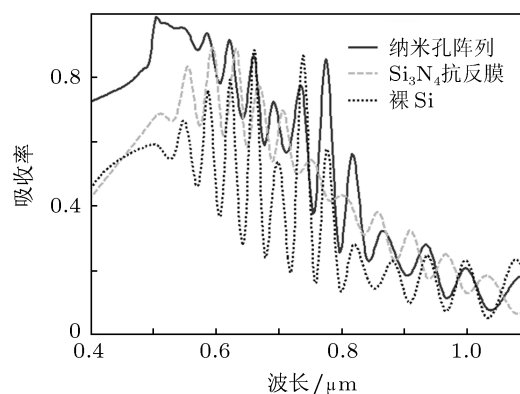


图5 吸光度计算

由图 5 可知, 纳米孔阵列增透膜太阳能电池的光吸收率最高, 单层 Si_3N_4 增透膜太阳能电池次之, 无增透膜的太阳能电池最低. 当波长小于 550 nm 时纳米孔阵列增透膜太阳能电池对光的吸收效果是最强的; 当波长大于 550 nm 时, 由于太阳能电池的金属反射面和上表面形成了法珀腔, 导致吸收谱线发生振荡.

3.2 器件转换效率计算

为了得到器件光特性对其电特性的影响, 利用典型的太阳能电池的理论模型 [19] 计算了不同表面结构器件在标准 AM1.5 太阳光谱照射条件下的短路电流、开路电压和转换效率:

$$J_{sc} = eN_{ph}\eta_c \quad (4)$$

$$N_{ph} = \sum A_{nano} \cdot S_{solar}$$

$$V_{oc} = (kT/e)\ln(J_{sc}/J_{s0} + 1) \quad (5)$$

$$\eta = \frac{J_{sc}V_{oc}\eta_f}{P_{in}} \quad (6)$$

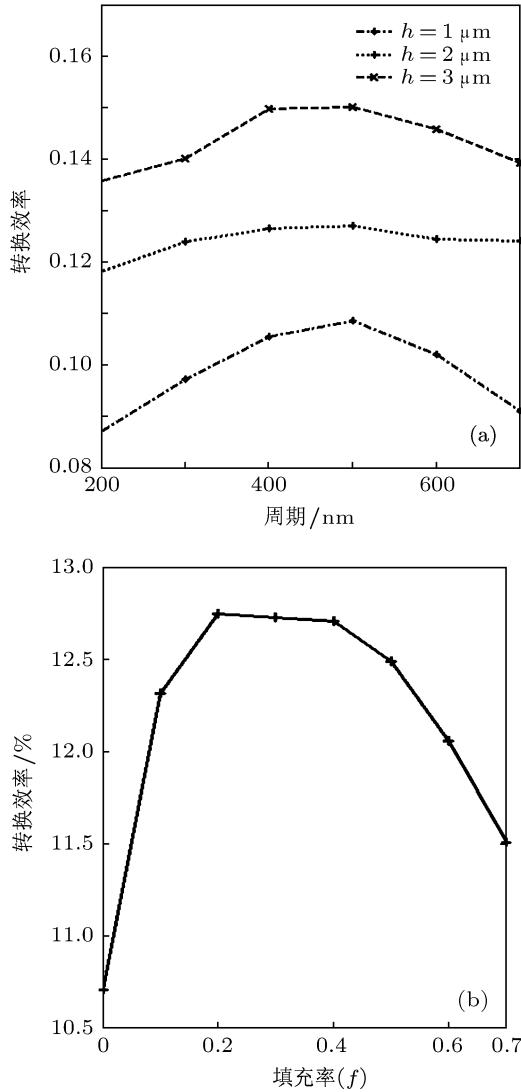


图6 (a) 转换效率与纳米孔阵列周期 Λ 的关系; (b) 转换效率与纳米孔阵列填充率 f 的关系

其中, J_{sc} 是器件的短路电流密度, e 是电子电量, η_c 是一个统计学参数, 代表着受表面复合和光伏器件材料影响的载流子收集效率, N_{ph} 是单位时间单位面积吸收的总的光子数; V_{oc} 是器件的开路电压, k 是 Boltzmann 常数, T 是开氏温度, J_{s0} 是反偏时的饱和电流密度; η_f 是光伏器件的填充因子, P_{in} 是 AM1.5 太阳光谱照射下的入射光功率. 参照文献 [19] 对于所计算的单晶 Si 光伏器件各个参数的取值为: $P_{in} = 0.1 \text{ W/cm}^2$, $\eta_f = 0.8$, $\eta_c = 0.85$, $J_{s0} = 1.5 \times 10^{-15} \text{ A/cm}^2$, $T = 300 \text{ K}$, S_{solar} 为 AM1.5 太阳光

谱. 将 3.1 节计算得到的光吸收率 A_{nano} 代入 (4)—(6) 式计算得: 无增透膜器件转换效率为 8.48%, 单层 Si_3N_4 增透膜器件的转换效率为 10.71%, 纳米孔阵列增透膜器件的转换效率为 12.71%. 由此可知, 相比单层 Si_3N_4 增透膜, 纳米孔阵列增透膜对光伏器件转换效率的提高更加明显.

3.3 纳米孔阵列特征薄膜参数优化

为了得到纳米孔阵列增透膜的最佳增透效果, 本文对其特征参数进行了优化, 优化结果如图 6 和图 7 所示.

假定填充率 $f = 0.4$, 改变纳米孔阵列的周期 Λ 得到的太阳能电池转换效率与 Λ 之间的关系 (如图 6(a)). 由图可知, 当填充率不变, 对于不同的掺杂 Si 厚度 ($h = 1 \mu\text{m}$, $h = 2 \mu\text{m}$, $h = 3 \mu\text{m}$), 转换效率随着周期 Λ 的不同而变化, 均在周期为 500 nm 时达到最大.

假定周期 $\Lambda = 500 \text{ nm}$, 改变纳米孔阵列填充率 f 得到太阳能电池转换效率与 f 之间的关系 (如图 6(b)). 由图可知, 随着纳米孔阵列填充率的变化, 太阳能电池的转换效率也随之变化, 当 $f = 0.2$ 时太阳能电池的转换效率最大.

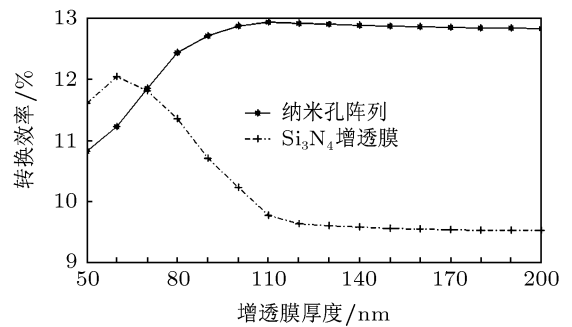


图7 转换效率与增透膜厚度的关系

当膜的厚度不同时, 膜的增透特性随之变化, 图 7 表示当膜的厚度 t 变化时, 单层增透膜太阳能电池和纳米孔阵列增透膜太阳能电池转换效率的变化趋势. 由图可知, 对于纳米孔阵列增透膜太阳能电池, 最优的增透膜厚度约为 110 nm; 对于单层 Si_3N_4 增透膜太阳能电池, 最优的增透膜厚度约为 60 nm.

由 3.1 和 3.2 的分析可知, 纳米孔增透膜降低了器件对入射光的反射, 同时下层反射层也增加了光在器件中的光程, 提高了器件的光吸收, 从而提

高了器件转换效率. 根据等效介质理论^[20], 由于纳米孔阵列的存在改变了 Si_3N_4 薄膜的等效折射率, 使得纳米孔阵列增透膜的折射率与单层 Si_3N_4 增透膜的折射率不同, 因此两种增透膜的最佳厚度不同. 由上述分析可得纳米孔阵列增透膜的最优结构参数为: 周期 $\Lambda = 500 \text{ nm}$, 填充率 $f = 0.2$, 厚度 $t = 110 \text{ nm}$.

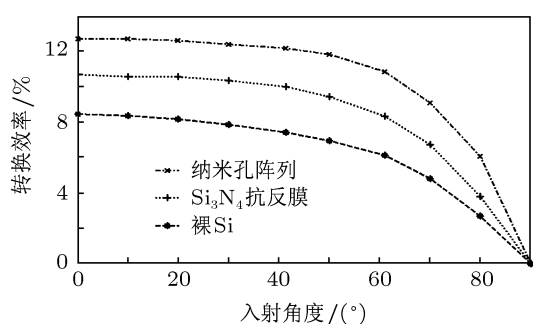


图8 转换效率与入射光角度的关系

3.4 入射光角度对太阳能电池转换效率的影响

太阳能电池对入射光的角度很敏感, 当入射光的角度不同时, 太阳能电池的转换效率也不同. 本文计算了入射角度不同时, 不同表面太阳能电池的转换效率, 结果如图8所示(此处假设 $\beta=0$, $\theta=90^\circ$ 为 TE 波入射). 表面没有增透膜的太阳能电池对入射光的角度 α 变化比较敏感, 当入射光偏离垂直面时, 其转换效率迅速下降. 单层 Si_3N_4 增透膜太阳能电池对入射角度 α 的敏感程度降低, 随入射角度的变化其变化比较平稳, 当入射光角度大于 40° 时, 太阳能电池的转换效率迅速下降. 表面为纳米孔阵列增透膜的太阳能电池在入射光入射角度小于 $\pm 10^\circ$ 时, 其转换效率基本不变, 当入射光角度大于 50° 时, 太阳能电池的转换效率下降速度增快. 可见, 纳米孔阵列增透膜降低了太阳能电池对入射光角度的敏感度.

4 实验研究

纳米孔阵列可以通过光刻和刻蚀工艺来实现. 为了验证纳米孔阵列薄膜对光伏器件性能的提高情况, 本文选用与光电池性能相近的 Si 探测

器 ($\varnothing 200 \mu\text{m}$) 作为实验器件, 利用微纳加工技术^[21] 在其 Si_3N_4 增透膜上面加工纳米孔阵列. 为了得到精确的对比结果, 在同一个 Si 探测器上面加工了不同尺寸的纳米孔阵列, 如图9所示.

由3.3的分析可知纳米孔的最优填充率为0.2, 当填充率在0.2—0.4之间变化时, 器件的转换效率变化不大. 考虑到加工的难易程度, 在器件加工中纳米孔的填充率设计为0.4. 由于所加工的纳米孔阵列尺寸较小, 为此搭建了专用的测试实验装置来测量不同光照条件下 Si 探测器的光电特性. 利用分光光度计测试了器件的光谱响应度, 器件的光谱响应度如图10所示. 器件在加工纳米孔阵列之前的光谱响应度曲线如图10中虚线所示; 在 Si_3N_4 增透膜上加工周期为 500 nm , 填充率为0.4的纳米孔阵列后, 其光谱响应度曲线为图10中的实线所示. 由图可知, 在 $400\text{—}600 \text{ nm}$ 范围内器件响应度变化较大, 与3.1节的数值计算一致.

试验中通过对比不同光照下探测器的开路电压 V_{oc} 和短路电流 I_{sc} 来评价器件的性能. 参照文献[19]光伏器件的最大输出功率通常为 $P \sim 0.8I_{sc}V_{oc}$, 故利用开路电压和短路电流能够准确地评价探测器的性能. 利用 488 nm 激光器和 532 nm 激光器测试器件在 $400 \text{ nm—}600 \text{ nm}$ 波段的光电特性; 利用与 AM1.5 太阳光谱基本一致的氙灯太阳仿真器来测量器件在 $400 \text{ nm—}1100 \text{ nm}$ 波段的光电特性. 实验测得器件的开路电压和短路电流如表1和表2所示.

表1 不同纳米孔结构器件的开路电压 V_{oc}/V

	488 nm	532 nm	氙灯系统
$\Lambda = 400 \text{ nm}$	0.327	0.312	0.322
$\Lambda = 500 \text{ nm}$	0.33	0.315	0.325
$\Lambda = 600 \text{ nm}$	0.3255	0.31	0.32
Si_3N_4 增透膜	0.322	0.307	0.318

表2 不同纳米孔结构器件的短路电流 $I_{sc}/\mu\text{A}$

	488 nm	532 nm	氙灯系统
$\Lambda = 400 \text{ nm}$	0.604	0.2833	1.238
$\Lambda = 500 \text{ nm}$	0.621	0.2915	1.249
$\Lambda = 600 \text{ nm}$	0.597	0.2792	1.224
Si_3N_4 增透膜	0.547	0.252	1.17

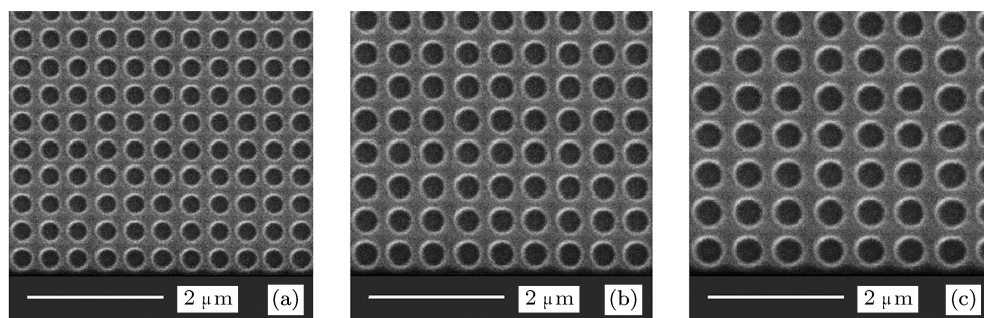


图9 不同纳米孔阵列的扫描电镜照片 (a) $\Lambda = 400$ nm, $f = 0.4$; (b) $\Lambda = 500$ nm, $f = 0.4$; (c) $\Lambda = 600$ nm, $f = 0.4$

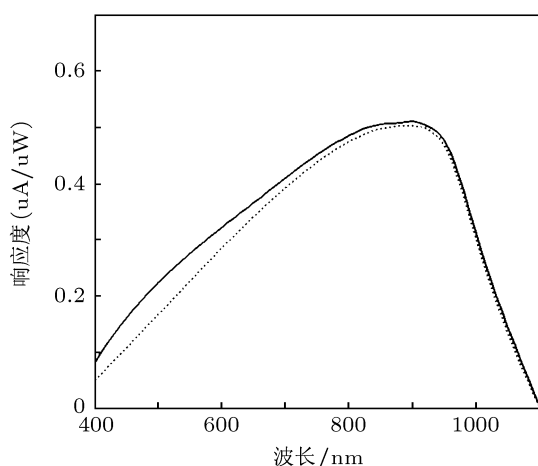


图10 光谱响应度曲线

由于加工误差的存在, 纳米孔阵列的周期和填充率与理论模型中的参数有所差别, 导致实验测得的数据与理论结果会有一定误差. 由表 1, 表 2 可知, 纳米孔阵列增透膜对器件的短路电流提高较大, 且在不同的光照条件下, 对于周期为 500 nm, 填充率为 0.4 的纳米孔阵列, 短路电流的提高均是最大的. 在 532 nm 激光照射条件下短路电流的提高约为 15%, 在 488 nm 激光照射条件下短路电流的提高约为 13%, 两种照射条件下开路电压的提高都很小, 约为 2%, 由此可得, 器件在 400 nm—600 nm 波段转换效率的提高约为 15%. 在氙灯照射条件下, 器件的短路电流提高约为 6.3%, 开路电压提高约为 2%. 可知, 器件在 400 nm—1100 nm 波段转换效

率的提高约为 9%. 实验结果表明: 纳米孔阵列薄膜能够提高光伏器件的光吸收, 从而提高了器件的转换效率, 与理论分析相一致.

5 结论

在薄膜中加工纳米孔阵列能够改变薄膜的等效折射率, 从而改变薄膜的光学特性. 本文提出利用微纳加工技术把光伏器件表面增透膜制作成纳米孔阵列结构的方法来提高器件的光吸收和转换效率. 利用严格耦合波理论分析了纳米孔阵列薄膜的光学特性, 并对纳米孔阵列的结构进行了优化. 纳米孔阵列薄膜作为光伏器件的增透膜能够很好地提高器件的转换效率, 且当纳米孔阵列的周期为 500 nm, 填充率为 0.2, 厚度为 110 nm 时, 器件的转换效率提高最大. 利用微纳加工技术在 $\Phi 200$ μm 的 Si 探测器上加工出填充率为 0.4, 周期分别为 400 nm, 500 nm 和 600 nm 的三种结构, 并搭建了相应的实验测试装置. 测量得到纳米孔阵列周期为 500 nm 时, 器件的转换效率最高; 且相比于单层 Si_3N_4 增透膜的器件, 在 400 nm—1100 nm 波段短路电流提高为 6%, 在 400 nm—600 nm 波段短路电流提高约为 15%, 实验结果与理论分析一致, 验证了纳米孔阵列对光伏器件性能的提高. 理论分析与实验结果表明, 该方法既能提高光伏器件的转换效率又与光伏器件的加工工艺相兼容, 具有很高的实用价值.

- [1] Catchpole K R, Polman A 2008 *Opt. Express* **16** 21793
- [2] Walheim S, Schäffer E, Mlynek J, Steiner U 1999 *Science* **283** 520
- [3] Stupca M, Alsalhi M, AlSaud T, Almuhanha A, Nayfeh M H 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 063107
- [4] Zhang H X, Gu Y, Gong Q H 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2567
- [5] Pillai S, Catchpole K R, Trupke T, Green M A 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 093105
- [6] Song Y M, Yu J S, Lee Y T 2010 *Opt. Lett.* **35** 276
- [7] Han T, Meng F Y, Zhang S, Wang J Q, Cheng X M 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 027303 (in Chinese) [韩涛, 孟凡英, 张松, 汪建强, 程雪梅 2011 物理学报 **60** 027303]
- [8] Hu L, Chen G 2007 *Nano Lett.* **7** 3249
- [9] Han S E, Chen G 2010 *Nano Lett.* **10** 1012
- [10] Her T H, Finlay R J, Wu C 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 1673
- [11] Mei H, Wang C, Yao J 2011 *Opt. Commun.* **284** 1072
- [12] Zhao H J, Yang S L, Zhang D, Liang K Y, Cheng Z F, Shi D P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6236 (in Chinese) [赵华君, 赵守良, 张东, 梁康有, 程正富, 石东平 2009 物理学报 **58** 6236]
- [13] Kong W J, Yun M J, Sun X, Liu J H, Fan Z X, Shao J D 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4904 (in Chinese) [孔伟金, 云茂金, 孙欣, 刘均海, 范正修, 劭建达 2008 物理学报 **57** 4904]
- [14] Yu W X, Lu Z W, Wang P 2001 *Acta Photon. Sin.* **30** 331(in Chinese) [鱼卫星, 卢振武, 王鹏 2001 光子学报 **30** 331]
- [15] Zhou C H, Wang L, Nie Y, Wang Z H 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 68 (in Chinese) [周传宏, 王磊, 聂娅, 王植恒 2002 物理学报 **51** 68]
- [16] Yu W X, Lu Z W, Wang P 2001 *Acta Optica Sin.* **30** 331(in Chinese) [鱼卫星, 卢振武, 王鹏 2001 光学学报 **21** 980]
- [17] Yu Y Q 1999 *Concise Course of Electrodynamics* (Beijing: Peking University Press) p12 (in Chinese) [俞允强 1999 电动力学简明教程 (北京: 北京大学出版社) 第 12 页]
- [18] Palik E D 1985 *Handbook of Optical Constants of Solids* (3rd Ed) (Orlando, FL:Academic) p531
- [19] Feng N N, Michel J, Zeng L 2007 *IEEE Trans. Electron Dev.* **54** 1926
- [20] Yang G G 2008 *Micro-Optics and System* (Zhejiang: Zhejiang University Press) p82 (in Chinese) [杨国光 2008 微光学与系统 (杭州: 浙江大学出版社) 第 82 页]
- [21] Ni X Y 2007 *Preparation of Nano-Material* (Beijing: Chemical Industry Press) p97 (in Chinese) [倪星元 2007 纳米材料制备技术 (北京: 化学工业出版社) 第 97 页]

Characteristics of the photovoltaic device with nanohole array antireflection coating layer*

Wang Ning Zhu Yong[†] Wei Wei Chen Jian-Jun Li Ping Wen Yu-Mei

(Key Laboratory for Optoelectronic Technology and System, Education Ministry of China, College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

(Received 7 April 2011; revised manuscript received 16 May 2011)

Abstract

The optical characteristic of the nanohole array film is analyzed by using rigorous coupled wave, and the nanohole array film is proposed to serve as photovoltaic device anti-reflection film to improve the device absorption and efficiency. According to theoretical analysis, nanohole array anti-reflection film has a better anti-reflection effect than the monofilm and can better enhance the photovoltaic device's efficiency, especially in a spectral range of 400 nm–600 nm; the optimal period of the nanohole array is 500 nm, the optimal filling factor of the nanohole array is 0.2 and the optimal thickness of the nanohole array is 110 nm. In order to testify the optical effect of nanohole array, the nanohole arrays of different sizes are made by the micro-nano processing technology in the anti-reflection film of the $\Phi 200\ \mu\text{m}$ Si Detector, and a relevant experimental system is set up. With the optimized nanohole arrays, the short circuit currents of the experimental sample are increased $\sim 6\%$ in a 400–1100 nm spectral range, especially, increased $\sim 15\%$ in a 400 nm–600 nm spectral range.

Keywords: nanohole arrays, photovoltaic device, rigorous coupled wave

PACS: 88.40.hj, 79.60.Jv, 78.20.Bh

* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50830202) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60707010).

[†] E-mail: yongzhu@cqu.edu.cn