

中频磁控溅射法制备掺氢氮化硅减反/钝化复合功能薄膜的研究*

沈国晟¹, 陈文理¹, 李 仲², 洪瑞江¹

(1. 中山大学太阳能系统研究所//广东省光伏技术重点实验室, 广东 广州 510006;
2. 青海民族大学物理与电子信息科学学院, 青海 西宁 810007)

摘要:使用中频磁控溅射法制备了具有光学减反射与电学钝化的复合功能的氮化硅(SiN_x)薄膜, 并对其结构和性能进行了综合研究。结果表明: 在常规制绒硅片上沉积的两种不同折射率的单层 SiN_x 减反膜表现出优异的光学性能, 其在300~1100 nm波段的平均反射率由镀膜前的14.86%下降到镀膜后的5.50%和6.58%; 若采用多层的氮化硅($m\text{-SiN}_x$) + 氮氧化硅(SiO_xN_y)薄膜作为减反层, 则其平均反射率进一步下降到4.03%。同时, 优化工艺制备得到的掺氢氮化硅($\text{SiN}_x\text{:H}$)薄膜, 表现出良好的电学钝化特性。试验中分别制备了两种复合结构的薄膜, 即 $\text{SiN}_x\text{:H}$ (厚度15 nm) + $m\text{-SiN}_x$ + SiO_xN_y 与 $\text{SiN}_x\text{:H}$ (厚度30 nm) + $m\text{-SiN}_x$ + SiO_xN_y 复合薄膜, 其平均反射率分别为5.88%和5.43%; 把这两种薄膜用于晶体硅太阳能电池上, 其开路电压则都达到了575 mV, 表现出良好的性能。

关键词: 太阳能电池; 掺氢氮化硅薄膜; 减反膜; 钝化膜; 中频磁控溅射

中图分类号: TM914.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2016)05-0031-06

Silicon nitride thin films with passivation and anti-reflection properties prepared by mid-frequency magnetron sputtering

SHEN Guosheng¹, CHEN Wenli¹, LI Zhong², HONG Ruijiang¹

(1. Institute for Solar Energy Systems // Guangdong Provincial Key Laboratory of Photovoltaic Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China;
2. College of Physics and Electronic Information Engineering, Qinghai Nationalities University, Xining 810007, China)

Abstract: Silicon nitride (SiN_x) film with excellent quality in both passivation and anti-reflection was deposited by mid-frequency (MF) magnetron sputtering process. The structure, optical property and other relevant performances of the thin films were investigated. The results show that, in the range of 300 - 1100 nm, the average reflection of the textured silicon decreased from 14.86% to 5.50% and 6.58% respectively by applying two different single layer of SiN_x films. The average reflection further decreased to a value of 4.03% when a multilayer of SiN_x + SiO_xN_y film was applied. Meanwhile, a hydrogen doped silicon nitride ($\text{SiN}_x\text{:H}$) film was prepared for the passivation purpose. Based on the parameter optimization, two series of the composite films including $\text{SiN}_x\text{:H}$ (15 nm in thickness) + SiN_x + SiO_xN_y and $\text{SiN}_x\text{:H}$ (30 nm in thickness) + SiN_x + SiO_xN_y were prepared. The average reflections of the composite films reached at 5.88% and 5.43%, respectively. The films were then applied to the crystalline silicon

* 收稿日期: 2016-03-09

基金项目: 青海省应用基础研究计划资助项目(2014-ZJ-725); 广东省科技计划资助项目(2014A010106009)

作者简介: 沈国晟(1991年生), 男; 研究方向: 薄膜技术; 通讯作者: 李仲, 洪瑞江; E-mail: 13709736484@163.com, hongruij@mail.sysu.edu.cn

solar cells, an open circuit voltage of 575 mV were achieved, indicating the composite film with a good passivation property.

Key words: solar cell; hydrogen doped silicon nitride; anti-reflection film; passivation film; mid-frequency magnetron sputtering

薄膜技术在光伏产业上有着广泛的应用^[1-3]。对于高效晶体硅电池来说,在其表面制备兼具光学减反射与电学钝化的功能薄膜至关重要^[4-5]。减反射效果的好坏很大程度决定了太阳电池的短路电流大小,而其开路电压则是衡量钝化效果如何的一个标准。常用的方法是使用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)技术沉积一层掺氢氮化硅($\text{SiN}_x\text{:H}$)来作为减反钝化薄膜。然而,PECVD工艺使用的硅烷(SiH_4)是易燃易爆气体,所以人们又尝试着使用磁控溅射来制备这层减反钝化薄膜。早在1999年,Vetter等^[6-7]报道了将氮气(N_2)和氢气(H_2)作为反应气体,运用射频磁控溅射方法制备具有钝化效果的非晶掺氢氮化硅($\alpha\text{-SiN}_x\text{:H}$)薄膜,将硅片的表面复合速率降至 60 cm/s ,并表征了该薄膜;同时认为其特征与PECVD所制备的薄膜接近。二者都强调使用的是射频电源,其理由是射频电源频率较高、极性转换快,使得轰击粒子的加速时间短,从而能量低,降低了沉积薄膜时对表面的溅射损伤。本文使用的是中频电源,其频率低于射频电源的频率,即电场极性转换的频率较低,这将增加粒子加速的时间从而增加粒子碰撞时候的动能,使溅射产额变高,沉积速率提高。但过高能量的轰击粒子可能会使硅片表面产生缺陷。在掺入 H_2 进行反应溅射后,氢离子将会填补缺陷及悬挂键,从而对表面态密度的降低有一定帮助。Choi等^[8]研究了抛光硅片上沉积 $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ 双层薄膜的光学特性,并在 $400\sim 1\,100\text{ nm}$ 波段得到了平均反射率约为3%。后来Kuo等^[9]制备了 $\text{SiO}_x/\text{SiO}_x\text{N}_y/\text{SiN}_x$ 三层结构薄膜,并应用于宽波段的减反射。但这些研究都只关注了单一的钝化特性或减反特性,而且其薄膜也未能应用于太阳能电池产品。本文选用中频磁控溅射法来制备薄膜,目的是在沉积速率和钝化效果中找到一个平衡点,制备出性能优良的薄膜。同时,通过多层氮化硅薄膜的优化设计,达到减反射的效果。最后将具有减反、钝化复合功能的多层薄膜,应用到单晶硅太阳能电池上,并以开路电压(V_{oc})与短路电流密度(J_{sc})来表征其减反射和电学钝化的效果。

1 实验方法

实验中的薄膜测试样品,使用双面抛光的 p 型

单晶硅片(性能参数为:CZ, $<100>$ 晶向、厚度 $300\text{ }\mu\text{m}$ 、电阻 $1\sim 30\text{ }\Omega$)作为衬底,通过改变工作气氛从而在其表面实现 SiN_x 、 SiO_x 、 $\text{SiN}_x\text{:H}$ 薄膜的沉积制备。通过X射线光电子能谱分析(XPS)(Thermo Scientific-ESCALab250型)分析薄膜的元素组分比、电子扫描电镜(SEM)(Hitachi-S4800型)观察薄膜的微观形貌,椭偏仪(Sentech-SpectraRay/3型)测定薄膜的折射率与厚度,傅里叶红外光谱(FTIR)(Bruker-EQUINOX 55型)分析薄膜的成分与结构。在得到薄膜的折射率后,使用TFCalc光学模拟软件进行优化,得到在制绒硅片上的优化薄膜厚度。

用于太阳能电池测试的样品,采用从东莞南玻光伏科技有限公司获得的单晶硅片,其性能参数为:CZ、 $<100>$ 晶向、厚度 $200\text{ }\mu\text{m}$ 、方阻 $60\text{ }\Omega/\square$,采用常规制绒,其在 $300\sim 1\,100\text{ nm}$ 波段平均反射率为14.86%。在其表面上沉积经优化后的减反/钝化复合薄膜前,硅片都经过常规RCA清洗,并浸泡在 $\varphi=10\%$ 氢氟酸(HF)中除去氧化层。最后,丝网印刷前电极银栅线、蒸镀 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 厚的铝背场并烧结制成可进行 I - V 测试的太阳能电池。印刷银栅线前进行了反射率的测试,制成太阳能电池后进行外量子效应(EQE)测试(PV Measurements-QEX10型)和 I - V 测试(HALM-Cetis PV型)。

2 结果与讨论

在反应溅射中,不同的工作气压、功率及气体流量,将极大地影响薄膜的沉积及其性能。实验中,本底真空为 $5\times 10^{-4}\text{ Pa}$ 、工作气压为 0.2 Pa 、溅射功率为 $1\,000\text{ W}$,通过调节氩气(Ar)与氮气(N_2)的流量比从而调控气体分压来控制氮化硅薄膜的生长。由于采用的硅靶是由粉末冶金方式压制而成的,具有一定的孔隙率,而暴露在空气中的硅又将自然形成厚度约为 2 nm 的氧化硅层,这将不可避免地在沉积的时候引入不必要的杂质氧。但由于氧的成分占比比较低,所以在XPS分析中将忽略氧。

图1是沉积薄膜的SEM表面形貌。从图中可以看出,薄膜是成岛状生长的,岛间的沟道并没有被完全的填补,薄膜呈现非致密的生长。形成这种

薄膜结构的原因是：薄膜在衬底表面的缺陷处优先形核、生长，随后各岛都无序地扩张性生长，当在占据完第一层后、尚未填补完第一层的岛间空隙时，新的核便附着于岛顶并开始生长。这种生长模式导致溅射的薄膜较为疏松。由于稀疏孔洞的存在、且有一定的氧杂质而生成氮氧硅 (SiO_xN_y)，这会导致薄膜的折射率低于致密的 SiN_x 薄膜 (折射率 $n = 1.9 \sim 2.3$)。

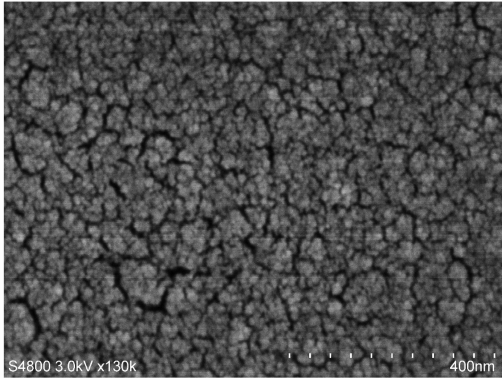


图 1 氮化硅薄膜的表面形貌

Fig. 1 SEM surface morphology of the SiN_x film

图 2 给出了氮气分压对薄膜成分及其折射率的影响规律。薄膜制备参数为：Ar 流量 q_{Ar} 为 100 mL/min, N_2 流量 q_{N_2} 分别为 2、3、5、10 mL/min。图 2 中，左边的纵坐标轴设为 x ，代表的是非化学计量比的非晶氮化硅 $a\text{-SiN}_x$ 里的 x 。通过 XPS 测定获得的薄膜中各元素组分的占比，在去除氧杂质和碳杂质的影响之后，用 $w(\text{N})$ 除以 $w(\text{Si})$ ，则得到 x 的值。随着氮气分压的提高，则 x 值上升，折射率下降，所制备的薄膜趋向于富氮的状态。拟合的直线可以近似看作是过零点的，表明符合理想情况，即在 N_2 分压为 0 的时候 (即只有通入 Ar 时的情形)， x 也是为 0。当 $q_{\text{Ar}}/q_{\text{N}_2}$ 为 100:2 时，其薄膜折射率最大，达到 1.88； $q_{\text{Ar}}/q_{\text{N}_2}$ 为 100:10 时，其薄膜折射率最小，为 1.66。对于致密的 SiN_x 薄膜，当 $x = 1.33$ 的时候，即为 Si_3N_4 ，其折射率应为 1.97，但由于我们制备出来的 SiN_x 如上所述是非致密的，且可能混杂 SiO_xN_y ，所以折射率会低于致密的 SiN_x 薄膜。

图 3 给出了氮气流量与薄膜沉积速率的关系曲线。薄膜的沉积速率基本都在 30 nm/min 左右。随着氮气分压的上升，沉积速率略有下降，这可能是反应溅射从“金属模式”转为“氮化模式”的结果，也就是说从 Si 靶溅射转变为 SiN 溅射模式。

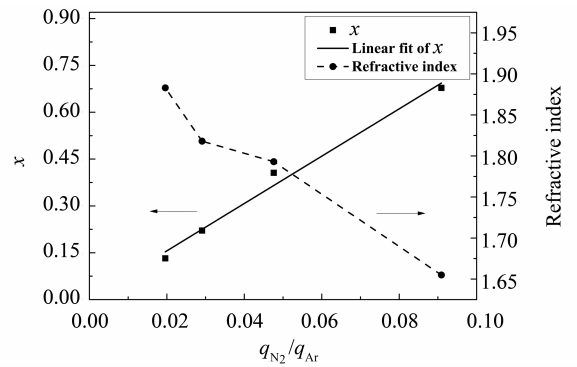


图 2 氮气分压比值与薄膜成分比及其折射率的关系

Fig. 2 The refractive index and component ratio of the SiN_x film at various N_2 partial pressures ration

N_2 分压越高，靶表面生成的越是富氮的 SiN_x ，越偏向于陶瓷属性，所以溅射产额的下降导致沉积速率的下降。从 XPS 的数据也可以看出： N_2 含量比例越高，沉积薄膜的氮含量也越高。

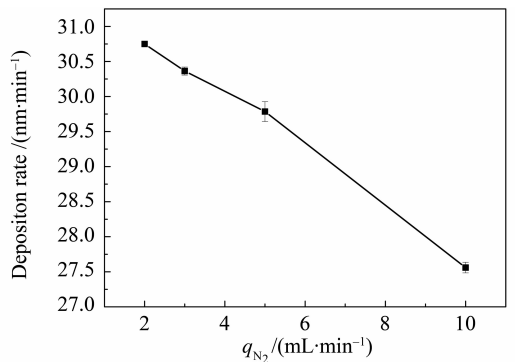


图 3 氮气流量与薄膜沉积速率的关系

Fig. 3 The dependent of the deposition rate of the film on the N_2 flow

在制备了 SiN_x 后，为了获得拥有钝化效果的 $\text{SiN}_x:\text{H}$ ，在实验中通入 H_2 参加反应溅射，希望能形成 Si-H 键从而填补硅的悬挂键、减少缺陷复合中心、降低表面态密度从而提高少子寿命、提高制成电池时的开路电压。图 4 给出了 $\text{SiN}_x:\text{H}$ 薄膜与衬底硅片的傅里叶红外 (FTIR) 谱图，为了将数据分开便于分析，将样品的吸光度整体提高了 0.3。对比 Vernhes 等^[13] 及 Mallorqui 等^[14] 所报道的结果，在忽略了背景噪音的 H_2O 峰和 CO_2 峰后 ($1\ 300 \sim 1\ 900\ \text{cm}^{-1}$ 和 $3\ 550 \sim 3\ 950\ \text{cm}^{-1}$) 可以看到，相较于 Si 衬底在 $1\ 107\ \text{cm}^{-1}$ 的 Si-O 键间隙氧原子峰^[10-12]、 $613\ \text{cm}^{-1}$ 的 Si-Si 键的特征峰，我们发现本实验得到的样品增加了以下 3 个峰：在 $3\ 356\ \text{cm}^{-1}$ 的 N-H 键的伸缩震动吸收峰、 $2\ 140$

cm^{-1} 的 Si - H 键的伸缩震动吸收峰以及 884 cm^{-1} 的 Si - N 键的非对称伸缩震动吸收峰。Si - H 键的峰并不像 Si - O 与 Si - Si 键一样比较尖锐, 其半峰宽较大, 这是因为 Si - H 键其实还可以细分为 2000 cm^{-1} 左右的 H - Si - Si₃、 2060 cm^{-1} 左右的 H - Si - HSi₂、 2100 cm^{-1} 左右的 H - Si - NSi₂、 2140 cm^{-1} 左右的 H - Si - SiN₂ 和 H - Si - SiNH、 2170 cm^{-1} 左右的 H - Si - HN₂ 以及 2220 cm^{-1} 左右的 H - Si - N₃ 键, 由此可推断样品中 H - Si - SiN₂ 和 H - Si - SiNH 键的含量较其它的键更高, 所以被标注为峰的位置。另外一个原因在于, H - Si 键相较 Si - Si 键更容易受邻近原子的影响, 导致峰位偏移的值比较大。同理可以解释 N - H 峰在 3356 cm^{-1} 也是一个半峰宽很宽的峰、Si - N 峰在 840 cm^{-1} 存在分峰。

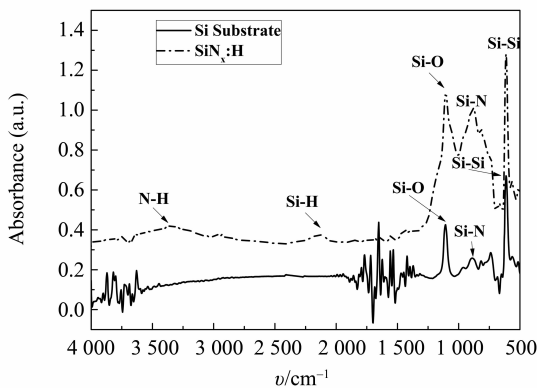


图 4 SiN_x:H 薄膜的 FTIR 谱图

Fig. 4 Measured infrared absorbance spectrum of the SiN_x:H thin films

我们分别以代号“SiN - 5”和“SiN - 3”来代表 $q_{\text{Ar}}/q_{\text{N}_2}$ 为 100:5 与 100:3 所制备的两种 SiN_x 薄膜, 它们的折射率与沉积速率分别如图 2 和图 3 所示。使用 TFCalc 软件进行模拟, 优化出只有单层膜时反射率最优的厚度, 均约为 80 nm。同时, 用插针法叠加折射率相差较大的两种氮化硅薄膜, 即制备时, $q_{\text{Ar}}/q_{\text{N}_2}$ 分别为 100:10 及 100:5, 记为“SiN - 10”和“SiN - 5”, 来模拟优化多层减反薄膜体系, 从而制备多层的氮化硅薄膜 (标记为 $m - \text{SiN}_x$), 这个多层薄膜实际上是由具有梯度折射率变化的薄膜叠加组成的。为了进一步增强减反效果, 还在最外层增加一层 SiO_xN_y 薄膜, 其制备参数是 $q_{\text{Ar}}/q_{\text{N}_2}/q_{\text{O}_2}$ 为 100:5:10。制备该薄膜的沉积速率为 25 nm/min, 在波长为 632 nm 时的折射率为 1.49。最后, 将上述各个经优化后的薄膜沉积

到制绒单晶硅片上, 并制成太阳能电池, 进行外量子效率测试和减反效果测试, 获得的外量子效应曲线与反射率曲线如图 5 所示。

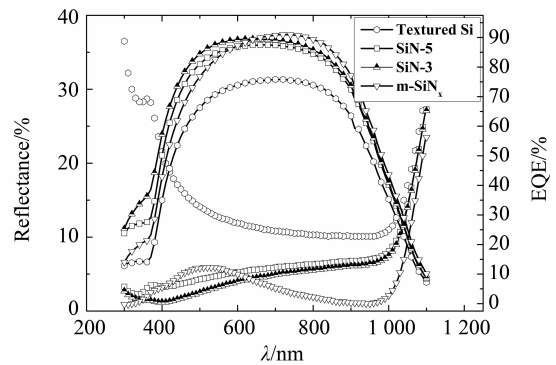


图 5 不同样品的反射率及外量子效应 (EQE) 曲线。

SiN - 3 与 SiN - 5: 镀单层氮化硅薄膜的样品;

$m - \text{SiN}_x$: 镀多层氮化硅薄膜的样品;

Textured Si: 没有镀膜的样品

Fig. 5 Comparison of the reflection spectra and external quantum efficiency of the solar cells with various films:

SiN_x single layer film (SiN - 5 and SiN - 3),

multilayer film ($m - \text{SiN}_x$) and no film (textured Si)

从图 5 的测试结果可以看出: SiN - 3 薄膜在 300 ~ 1100 nm 波段的平均反射率要低于 SiN - 5 薄膜的平均反射率。因为, 反射率表达为

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$$

式中, n_1 是入射介质的折射率, n_2 是出射介质的折射率, 而透射率则表达为: $T = 1 - R$ 。因此, 若只在硅 (Si) 与空气 (Air) 之间制备一层减反射薄膜 (AR) 的话, 硅片上的透射率应为 $T = T_{\text{Air-Air}} \times T_{\text{AR-Si}}$, 其最理想的折射率应为

$$n_{\text{AR}} = \sqrt{n_{\text{Si}} n_{\text{Air}}} = 1.84$$

由于 SiN - 3 薄膜的折射率比 SiN - 5 薄膜的折射率更为接近理想折射率, 所以总体而言, 其反射率要略低于 SiN - 5 薄膜。多层减反薄膜的反射率在短波段稍微高一些, 这是由于多种不同折射率薄膜叠加导致最低反射率点偏移至长波段, 短波段则反射率比单层的要高一些。实验测得在 300 ~ 1100 nm 波段的平均反射率分别为: 制绒硅 14.86%, SiN - 3 薄膜 5.50%, SiN - 5 薄膜 6.58%, 插针法优化多层减反结构的薄膜为 4.03%。可以看出: 在沉积了减反薄膜之后, 硅片的反射率比单一的制绒表面得到显著的降低; 同时, 镀有多层减反薄膜的反射率比只有单层减反膜的可再降低 1% ~ 2%。

外量子效应基本是随着反射率上升而下降，最高值为 91.28%，出现在 720 nm 处。

在硅片实现了减反射优化后，为了进一步使薄膜也具有钝化效果，实验中应用了多层膜的制备技术，在硅表面先沉积一层 $\text{SiN}_x:\text{H}$ 再沉积 $m-\text{SiN}_x$ 与 SiO_xN_y 层得到具有减反-钝化功能的复合薄膜。由于在加入 H_2 后，会加快“类靶中毒”现象产生：即电压下降、气压上升，导致沉积工艺变得不可控制。因此，为避免工艺不稳定，实验中沉积 $\text{SiN}_x:\text{H}$ 薄膜的时间应尽量短（沉积速率为 30 nm/min）。图 6 是几种沉积了薄膜的太阳电池的反射率与 EQE 效率测试结果，所沉积的薄膜分别是： $\text{SiN}_x:\text{H}$ （厚度 15 nm）+ $m-\text{SiN}_x$ + SiO_xN_y 复合膜、 $\text{SiN}_x:\text{H}$ （厚度 30 nm）+ $m-\text{SiN}_x$ + SiO_xN_y 复合膜及 $m-\text{SiN}_x$ + SiO_xN_y 复合膜。从测试结果可以看到：在 300 ~ 1100 nm 波段的平均反射率略有差别，当 $\text{SiN}_x:\text{H}$ 减反层较薄时，其反射率为 5.88%、略高于另一厚度的 5.43%。这是由于 $\text{SiN}_x:\text{H}$ 的折射率低于 $\text{SiN}-5$ 氮化硅薄膜的折射率，所以作为与硅片的交界的一层，将使整个膜系的反射率有所上升，但其减反射效果还是优于单层的氮化硅薄膜。

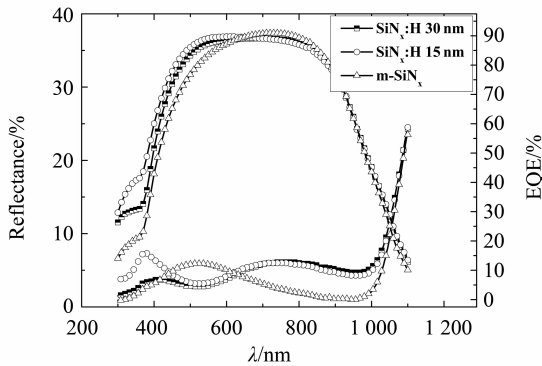


图 6 镀有多层 $\text{SiN}_x:\text{H}$ 与多层 SiN_x 减反薄膜的太阳电池的反射率及 EQE 效率

Fig. 6 Comparison of the reflection spectra and external quantum efficiency of the solar cells with various films

在沉积多层复合薄膜之后，经由后续工艺即丝网印刷银栅线、蒸镀铝背场及烧结等工序，我们获得了可进行效率测量的太阳电池。图 7 给出了分别沉积氮化硅（ $\text{SiN}-3$ 和 $\text{SiN}-5$ ）、多层氮化硅（ $m-\text{SiN}_x$ ）、掺氢氮化硅（ $\text{SiN}_x:\text{H}$ ）以及二氧化硅（ SiO_2 ）薄膜的晶体硅太阳电池的 $I-V$ 曲线。从短路电流密度 J_{sc} 上看： $\text{SiN}-3$ 样品的为 26.61 mA/

cm^2 ， $\text{SiN}-5$ 样品的为 26.83 mA/ cm^2 ， $m-\text{SiN}_x + \text{SiO}_x\text{N}_y$ 复合薄膜样品的为 27.44 mA/ cm^2 ，制绒硅片上仅经热氧化的为 24.16 mA/ cm^2 ， $\text{SiN}_x:\text{H}$ （厚度 30 nm）+ $m-\text{SiN}_x + \text{SiO}_x\text{N}_y$ 复合薄膜样品的为 27.75 mA/ cm^2 。可以看到相对于制绒硅片来说，单层膜的减反效果也是极其显著的，其太阳电池的短路电流提高了大约 2.5 mA/ cm^2 。采用复合减反薄膜的太阳电池可以进一步提高 1 mA/ cm^2 左右。沉积了 $\text{SiN}-3$ 和 $\text{SiN}-5$ 单层减反薄膜的两个样品，其短路电流的大小只相差 0.2 mA 左右，没有呈现较大的不同，我们推断这可能是电极制作的原因。对太阳电池的开路电压 V_{oc} 的测试表明：制备的掺氢氮化硅多层减反薄膜具有良好的钝化效果，即 V_{oc} 从 560 mV 左右提高到 575 mV。各样品的 V_{oc} 如下： $\text{SiN}-3$ 样品为 560 mV， $\text{SiN}-5$ 样品为 561 mV， $m-\text{SiN}_x + \text{SiO}_x\text{N}_y$ 复合薄膜的样品为 562 mV，制绒硅片仅经热氧化的为 569 mV，沉积了 30 nm 厚 $\text{SiN}_x:\text{H}$ 的样品为 575 mV。

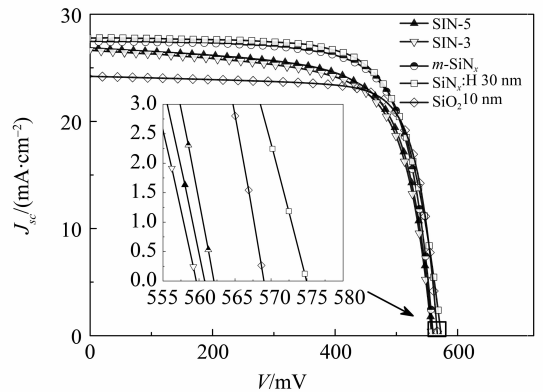


图 7 沉积各种薄膜（ SiN_x 、 $\text{SiN}_x:\text{H}$ 、 SiO_2 ）的太阳电池的 $I-V$ 曲线

Fig. 7 $I-V$ properties of the solar cells with different films: SiN_x , $\text{SiN}_x:\text{H}$ and SiO_2

3 结论

实验中所制备的薄膜呈现出较为疏松的多孔结构，相较于致密结构的 SiN_x ，其折射率要偏低一些。通过改变沉积气氛，可以获得不同折射率的薄膜，并成功制备出 $\text{SiN}_x:\text{H} + \text{SiN}_x + \text{SiO}_x\text{N}_y$ 多层的具有兼顾有减反与钝化性能的复合功能薄膜。单层 SiN_x 减反薄膜可以将制绒硅片的反射率从 14.86% 降至 5.50%，而 $m-\text{SiN}_x + \text{SiO}_x\text{N}_y$ 减反薄膜则可进一步将反射率降至 4.03%。在硅片表面处添加一层 $\text{SiN}_x:\text{H}$ 薄膜，可改善薄膜的钝化效果。将薄

膜应用于太阳能电池上,其短路电流从无镀膜的 24.16 mA/cm^2 提高至 27.44 mA/cm^2 (减反层为 $m - \text{SiN}_x + \text{SiO}_x\text{N}_y$) 以及 27.75 mA/cm^2 (减反层为 $\text{SiN}_x:\text{H} + m - \text{SiN}_x + \text{SiO}_x\text{N}_y$),开路电压则从原始的 560 mV 提高至 575 mV ,表现出良好的性能。这种复合功能薄膜在高效晶体硅太阳能电池上具有应用前景。

参考文献:

- [1] 洪瑞江,沈辉. 薄膜太阳能电池的研究现状和产业发展 [J]. 中国材料进展, 2009, 28: 35 - 44.
- [2] 赖键均,段春艳,艾斌,等. 355 nm YAG 皮秒脉冲激光晶化非晶硅薄膜的研究 [J]. 中山大学学报(自然科学版), 2012, 51 (3): 13 - 17.
- [3] CHEN W L, SHEN G S, WU Z, et al. Optimizing transparent conductive Al-doped ZnO thin films for SiN_x free crystalline Si solar cells [J]. Mater Sci: Mater Electron, 2016, 27: 7566 - 7572.
- [4] 李力,姜辰明,黄铭,等. 基于 IBC 太阳能电池的二氧化硅掩膜研究 [J]. 中山大学学报(自然科学版), 2014, 53 (5): 29 - 31.
- [5] 曾湘安,艾斌,邓幼俊,等. 硅片不同表面钝化工艺的稳定性研究 [J]. 中山大学学报(自然科学版), 2014, 53 (5): 14 - 18.
- [6] VETTER M, ROJAHN M. Properties of amorphous Si-rich silicon nitride prepared by rf-magnetron sputtering [J]. Materials Science and Engineering: B, 2000, 71 (1): 321 - 326.
- [7] VETTER M. Surface passivation of silicon by Rf magnetron-sputtered silicon nitride films [J]. Thin Solid Films, 1999, 337(1): 118 - 122.
- [8] CHOI K, KIM K J. Antireflection coating of a SiO/SiN double layer on silicon fabricated by magnetron sputtering [J]. Journal of Ceramic Processing Research, 2010, 11 (3): 341 - 343.
- [9] KUO T W, WANG N F, TSAI Y Z, et al. Broadband triple-layer $\text{SiO}_x/\text{SiO}_x\text{N}_y/\text{SiN}_x$ antireflective coatings in textured crystalline silicon solar cells [J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2014, 25: 211 - 218.
- [10] KOVALEV I D, KOTEREVA T V, GUSEV A V, et al. Determination of oxygen and carbon impurities in polycrystalline silicon by IR spectrometry [J]. Journal of Analytical Chemistry, 2008, 63(3): 248 - 252.
- [11] MÖLLER H J, FUNKE C, LAWERENZ A, et al. Oxygen and lattice distortions in multicrystalline silicon [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2002, 72(1/2/3/4): 403 - 416.
- [12] SABATINO M D, BINETTI S, LIBAL J, et al. Oxygen distribution on a multicrystalline silicon ingot grown from upgraded metallurgical silicon [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2011, 95(2): 529 - 533.
- [13] VERNHES R, ZABEIDA O, KLEMBERG-SAPIEHA J E, et al. Pulsed radio frequency plasma deposition of a- $\text{SiN}_x:\text{H}$ alloys: Film properties, growth mechanism, and applications [J]. Journal of Applied Physics, 2006, 100(6): 8022 - 8027.
- [14] MALLORQUÍA D, ALARCÓN-LLADÓ E, MUNDET I C, et al. Field-effect passivation on silicon nanowire solar cells [J]. Nano Research, 2015, 8(2): 673 - 681.