光电器件

PEDOT:PSS/n-Si和MoO_x/n-Si异质结太阳电池比较研究

王嘉文[1]，崔义乾[2*]，羊小倩[1]，张 瑜[1*]，于 威[2*]

（河北大学 1. 电子信息工程学院；2. 物理科学与技术学院 新能源光电器件国家地方联合工程实验室，河北 保定 071002）

摘 要： 文章对聚(3,4-乙烯二氧噻吩):聚(苯乙烯磺酸盐)(PEDOT:PSS)和氧化钼(MoO_x)两种空穴传输材料及其所制备的n-Si异质结隧穿氧化层钝化接触(TOPCon)太阳电池进行了系统地比较研究。首先,对比了PEDOT:PSS和MoO_x薄膜的功函数、电阻率、光吸收及对硅片的减反射作用等光电特性;随后,根据薄膜性质设计并制备全背电极结构的PEDOT:PSS/n-Si和MoO_x/n-Si异质结TOPCon太阳电池,通过量子效率(EQE)、光照/暗态J-V曲线及稳定性测试对比性能。结果表明,PEDOT:PSS/n-Si太阳电池具有更高的P-N结质量和转换效率,而MoO_x/n-Si太阳电池则具有更高的开路电压和稳定性。本研究为基于非掺杂硅基异质结太阳电池优化提供了理论参考。

关键词： MoO_x; PEDOT:PSS; 比较研究; 太阳电池; 非掺杂空穴传输层

中图分类号： TN304.055;TM914.4 **文章编号：** 1001－5868(2025)02－0240－08

A Comparative Study of PEDOT:PSS/n-Si and MoO_x/n-Si Heterojunction Solar Cells

WANG Jiawen[1], CUI Yiqian[2], YANG Xiaoqian[1], ZHANG Yu[1], YU Wei[2]

(1. College of Electronic and Informational Engineering; 2. National-Local Joint Engineering Laboratory of New Energy Photoelectric Devices, College of Physics Science and Technology, Hebei University, Baoding 071002, CHN)

Abstract: This study systematically examines poly(3,4-ethylenedioxythiophene):polystyrene sulfonate (PEDOT:PSS) and molybdenum oxide (MoO_x) as hole transport materials for n-Si heterojunction tunnel oxide passivated contact (TOPCon) solar cells. Initially, the photoelectric properties of PEDOT:PSS and MoO_x films, including work function, resistivity, light absorption, and anti-reflection effect on silicon wafers, were analyzed. Subsequently, full-back electrode PEDOT:PSS/n-Si and MoO_x/n-Si heterojunction TOPCon solar cells, featuring rear-located P-N junctions, were fabricated and subjected to experimental comparisons. Performance evaluations, conducted using quantum efficiency (EQE), light J-V, dark J-V, and stability tests, indicate that PEDOT:PSS/n-Si solar cells exhibited superior P-N junction quality and conversion efficiency. Conversely, MoO_x/n-Si solar cells demonstrated higher open-circuit voltage and enhanced stability. These findings provide valuable insights for developing targeted optimization strategies to improve the performance of non-doped silicon-based heterojunction solar cells.

Key words: MoO_x; PEDOT:PSS; comparative study; TOPCon solar cells; non-doped hole transport materials

收稿日期:2024－07－30.

*通信作者:崔义乾;张 瑜;于 威

0 引言

硅(Si)基太阳电池由于其优异的稳定性、高功率转换效率(PCE)和成熟的工业系统,占据了光伏市场95%以上的份额。其中,n型TOPCon太阳电池因其高效率,与现有生产线兼容而成为市场主流,逐渐取代p型发射极和背面钝化(PERC)太阳电池。然而,高温(约1 000 ℃)硼扩散技术作为制备TOPCon太阳电池的一种通用方法,其能耗成本巨大。此外,重掺硼的硅会导致严重的俄歇复合和寄生吸收。因此,寻找一种低能耗、免掺杂的空穴选择性材料具有重要的研究价值。氧化钼(MoO_x)[1-2]、聚(3,4-乙烯二氧噻吩):聚(苯乙烯磺酸盐)(PEDOT:PSS)[3-4]作为非掺杂空穴载流子选择性功能层,具有易制备、低成本等优点,是目前应用最广泛的两种空穴传输材料。

PEDOT:PSS是一种高掺杂p型有机聚合物,具有良好的透过性、导电性和易操作性[5-6],与Si叠层可得到良好的光谱响应[7]。相比于传统晶硅太阳电池通过高温扩散制备P-N结,采用旋涂法在晶硅表面沉积一层PEDOT:PSS薄膜制备PEDOT:PSS/n-Si异质结太阳电池,具有工艺简单与可塑性强等优势[8-10]。过渡金属氧化物MoO_x具有化学组成、晶相结构多样,导电性可大幅调节等特点,同时具有良好的光吸收特性,在晶硅太阳电池领域得到广泛的研究[11-13]。谷书辉采用射频磁控溅射技术制备MoO_x薄膜,并将其应用于Ag/ITO/MoO_x/n-Si/Ag结构的太阳电池,获得了6.05%的光电转换效率[14]。Battaglia等采用真空蒸发技术在n-Si衬底上沉积15 nm厚的MoO_x薄膜,用以制备MoO_x/n-Si异质结太阳电池,获得了14.3%的光电转换效率[15]。

对于PEDOT:PSS/n-Si和MoO_x/n-Si两种太阳电池,学界对其光电性能进行了广泛的研究[16-17],但是对两者电性能缺少系统分析比较。本文对比分析了PEDOT:PSS和MoO_x薄膜的光电性能,随后根据薄膜性质设计了全背电极PEDOT:PSS/n-Si和MoO_x/n-Si异质结太阳电池,并重点对异质结质量进行了比较研究,最后对两种器件进行了稳定性测试。结果表明,PEDOT:PSS/n-Si太阳电池具有更高的P-N结质量和转换效率,而MoO_x/n-Si太阳电池具有更高的开路电压和稳定性。

1 实验

1.1 薄膜制备

TOPCon结构制备:单面TOPCon结构(SiO_2/n(+)-poly-Si)的双面抛光n型硅片(电阻率1 Ω·cm,厚度160 μm)由常州比太科技有限公司提供。采用等离子体增强化学气相沉积和磁控溅射技术分别制备SiO_2和n(+)-poly-Si薄膜,厚度分别为0.8和100 nm。n(+)-poly-Si掺杂浓度为2×10^{20} cm^{-3}。

MoO_x薄膜制备:MoO_x薄膜是在室温下通过真空热蒸发系统制备,基础压力低于5×10^{-4} Pa。以高质量MoO_x粉末(纯度99.95%,购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司)为原料,置于蒸发舟中。在沉积过程中,施加来自加热舟皿的55 A电流,并通过石英晶体振荡监测薄膜厚度。

PEDOT:PSS薄膜制备:在PEDOT:PSS水溶液(Haraeus PH1000)中添加二甲基亚砜(DMSO)和表面活性剂Triton X-100,浓度分别为5和0.2 wt.%,搅拌3 h后过滤待用。将配制好的PEDOT:PSS溶液在硅片表面旋涂成膜,旋涂转速为1 000~2 500 rpm,旋涂时间为30 s,之后在加热台上100 ℃烘烤15 min。

1.2 器件制备

分别制备MoO_x/n-Si和PEDOT:PSS/n-Si异质结TOPCon太阳电池。器件制作前,首先将具有TOPCon结构(SiN_x与银栅线)的半成品硅片空白一侧浸入HF溶液3 min以完全去除自然氧化物,随后将硅片浸入去离子水中清洗并用惰性气体干燥。采用真空热蒸发系统蒸镀MoO_x至半成品硅片的空白一侧。最后采用热蒸发法沉积150 nm厚的银电极,形成Ag/SiN_x/n(+)-poly-Si/SiO_2/n-Si/MoO_x/Ag结构的异质结TOPCon太阳电池。同样在去除自然氧化物的半成品硅片的空白一侧制备PEDOT:PSS薄膜,采用热蒸法沉积150 nm银电极,形成Ag/SiN_x/n(+)-poly-Si/SiO_2/n-Si/PEDOT:PSS/Ag结构的异质结TOPCon太阳电池。

1.3 表征测试

利用四探针测试仪(M-3迷你型四探针测试仪)测量所有样品的方阻。使用配备积分球的紫外可见分光光度计(UV-vis,Hitachi U-4100)收集光学反射光谱。使用Thermo Scientific ESCALAB 250Xi光电子能谱仪(He Ⅰ,21.22 eV)进行紫外光电子能谱(UPS)测试,以测量PEDOT:PSS和

MoO_x薄膜的功函数。为了分析异质结TOPCon太阳电池的光伏性能，使用半导体参数分析仪（Agilent b1500-a）测量AM1.5太阳模拟器中的电流密度-电压（*J-V*）。使用CrownTech 1000ADX QE设置在300～1 200 nm波长范围内测量器件的系统光谱响应，即外部量子效率（EQE）。利用场发射扫描电镜（FEINova Nano SEM 450）对PEDOT:PSS薄膜的横截面形貌进行表征。

2 结果与讨论

功函数是空穴传输材料的重要参数，其决定着太阳电池内建电场的潜能，功函数越大，内建电场越强。高功函数空穴传输层是制备高效太阳电池的必要条件。利用UPS对PEDOT:PSS和MoO_x薄膜进行了功函数测试，结果如图1（a）所示。可以观察到，两种材料的二次电子截止边有较大的区别，这表明其功函数存在差异。材料的功函数可以根据UPS光谱中二次电子截止边及费米边的位置通过公式（1）求得：

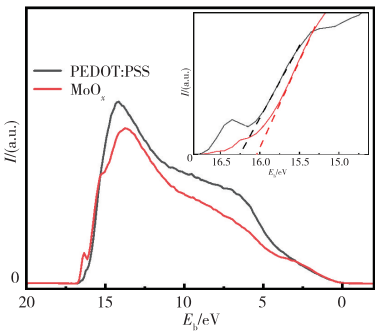
$$\Phi = h\nu + E_{cutoff} - E_F \quad (1)$$

式中，$h\nu$为激发光源光子能量，Φ为功函数，E_F为费米能级，E_{cutoff}为非弹性电子截止能，对应二次电子发射截止边。最终通过计算得到PEDOT:PSS和MoO_x的功函数分别为5.0和5.2 eV，与文献[17-18]报道一致。

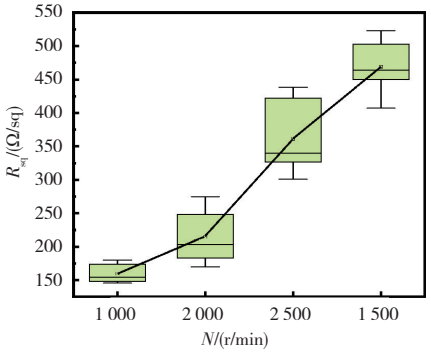
空穴传输层的导电性影响着光伏器件的体电阻以及与电极之间的接触电阻。为获得PEDOT:PSS和MoO_x薄膜的方阻，采用四探针法进行测试。PEDOT:PSS薄膜方阻的测试结果如图1（b）所示，不同转速的PEDOT:PSS薄膜方阻不同，随着转速的增加，PEDOT:PSS薄膜的方阻上升。这是转速增加导致薄膜厚度降低造成的。相关计算式为：

$$R_{sq} = \frac{\rho}{d} \quad (2)$$

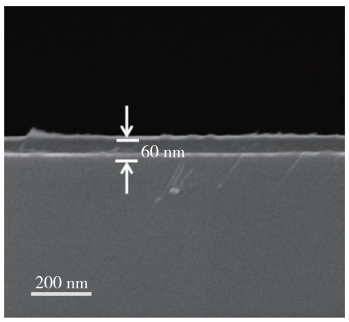
式中，R_{sq}是薄膜方阻，ρ是电阻率，d是薄膜的厚度。在1 500 r/min转速下PEDOT:PSS薄膜的SEM横截面图像如图1（c）所示，其厚度在60 nm左右。据此可推测不同转速所制备的PEDOT:PSS薄膜厚度应在20～80 nm范围内。对8～100 nm厚度范围内的MoO_x薄膜进行方阻测试，发现所有样品均超出了测试量程，这表明氧化钼具有很高的电阻率。结合上述测试结果，根据公式（2）可得出结论：MoO_x薄膜的导电性明显低于PEDOT:PSS薄膜。



（a）PEDOT:PSS和MoO_x薄膜的UPS光谱



（b）不同转速PEDOT:PSS薄膜的方阻

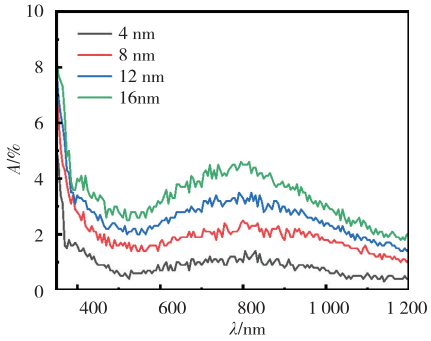


（c）PEDOT:PSS/n-Si结构的横截面SEM图像

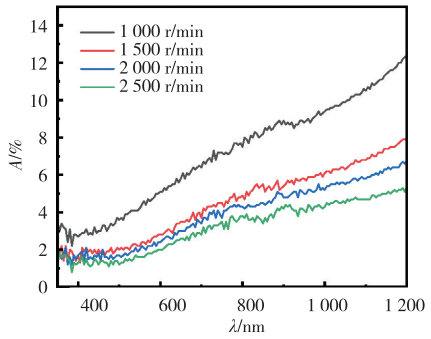
图1 同时测量UPS光谱及方阻，以及PEDOT:PSS/n-Si结构的横截面SEM图像

图2（a）和（b）为硅衬底上沉积不同厚度MoO_x及旋涂转速PEDOT:PSS薄膜吸收光谱。在300～1 200 nm范围内，PEDOT:PSS薄膜的寄生吸收随着膜厚度的增加而增加，且波长越长，寄生吸收越大。当PEDOT:PSS旋涂转速为1 000 r/min时，薄膜在所有波段的寄生吸收均迅速增加。当旋涂转速大于1 000 r/min时，薄膜的寄生吸收在每个波段范围内都处于较低水平。而对于MoO_x薄膜来说，短波段（300～450 nm）和中波段（600～800 nm）为主要吸收波段，随着MoO_x薄膜厚度增加，寄生吸收增大。图2（c）和（d）为在硅衬底上沉积不同厚度MoO_x及不同旋涂转速PEDOT:PSS薄膜的反射光

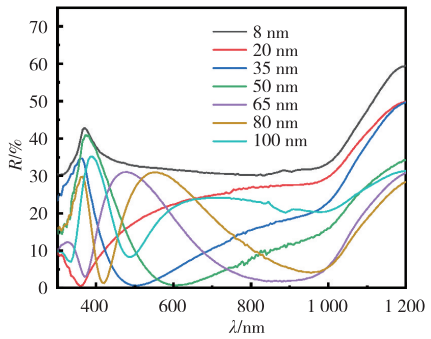
谱。可见，MoO_x薄膜和PEDOT:PSS薄膜都对硅片呈现出良好的减反射功能。旋涂转速低于1 000 r/min时所制备的薄膜均匀性较差，而高于2 500 r/min时会导致薄膜厚度过薄，均会造成太阳电池器件的性能降低，因此选择在1 000～2 500 r/min转速范围内对PEDOT:PSS薄膜进行反射率测试。根据太阳光谱能量分布，能量最大的区域在可见光部分波长为600 nm附近。旋涂转速为1 500 r/min所制备的PEDOT:PSS薄膜在600 nm波长处具有最低的反射率（R=9.3%），此时薄膜厚度约为60 nm（图1(c)）。对MoO_x薄膜的减反射功能进行测试，厚度从8 nm增加到100 nm，600 nm波长处对应的反射率呈现先降低后增加的趋势，MoO_x厚度为50 nm时反射率最小（R=0.7%），低于PEDOT:PSS薄膜的反射率。



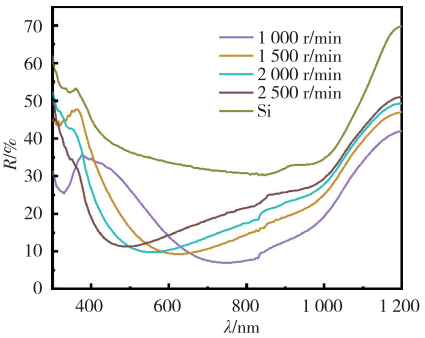
（a）沉积不同厚度的MoO_x薄膜



（b）不同旋涂转速PEDOT:PSS薄膜的吸收光谱



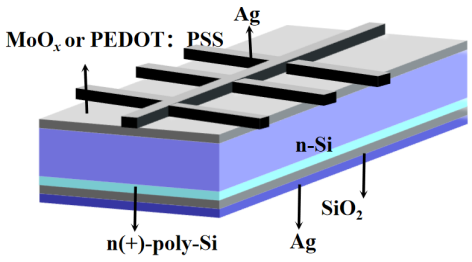
（c）沉积不同厚度的MoO_x薄膜



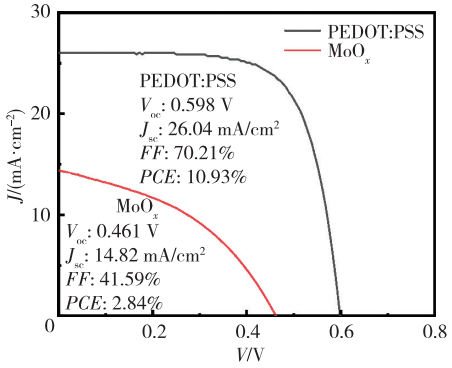
（d）不同旋涂转速PEDOT:PSS薄膜的反射光谱

图2　硅衬底上不同条件下的吸收及反射光谱

综上，MoO_x薄膜具有比PEDOT:PSS薄膜更优异的减反射功能，但其电阻率较高且横向导电性较差，用于n-Si太阳电池通常需要沉积较薄的厚度[19]。如果作为空穴传输层用于太阳电池的正面还需搭配一定厚度的透明导电薄膜，否则会导致太阳电池器件具有较差的填充因子（FF）[20]。对此进行了简单的实验验证，选取具有最佳反射率的MoO_x薄膜（50 nm）和PEDOT:PSS薄膜（1 500 r/min）分别制备异质结太阳电池，器件结构如图3(a)所示。J-V曲线和具体的性能参数如图3(b)所示，MoO_x/n-Si异质结TOPCon太阳电池的FF仅为41.59%，各项光伏参数均明显低于PEDOT:PSS/n-Si异质结太阳电池。



（a）器件结构示意图



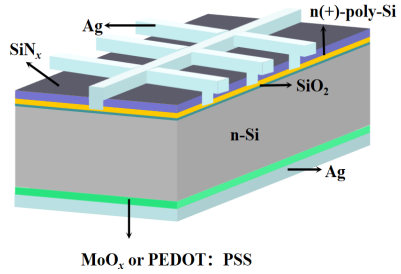
（b）光照J-V曲线

图3　两种材料不同条件下作为空穴传输层的异质结太阳电池器件结构示意图及光照J-V曲线图

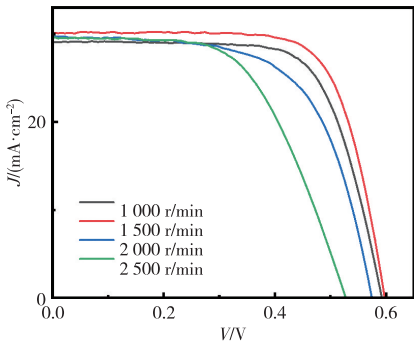
为更好比较两种材料和硅结合形成的P-N结质量，将具有TOPCon背场的一面置于入光面，发射极置于背面，以避免受到PEDOT:PSS和MoO_x薄膜反射率差异的影响。此外，背面蒸镀全表面银，用于消除MoO_x与PEDOT:PSS导电性的差距。为获得最佳的器件性能，分别通过调节沉积时间和旋涂转速对MoO_x和PEDOT:PSS薄膜的厚度进行优化。对于PEDOT:PSS/n-Si异质结TOPCon太阳电池，旋涂转速为1 500 r/min时器件得到了最佳性能；对于MoO_x/n-Si异质结TOPCon太阳电池，MoO_x薄膜厚度为12 nm时器件获得了最佳性能。最佳效率分别为13.28%和13.16%，具体光伏参数见表1。PEDOT:PSS/n-Si和MoO_x/n-Si太阳电池冠军器件的外量子效率曲线如图4(d)所示，通过对EQE数据进行积分计算得到器件的J_{sc}值分别为30.74和30.48 mA/cm^2，证实了*J-V*测试的J_{sc}结果。同时可以看出，PEDOT:PSS/n-Si异质结太阳电池在短中波段(500~700 nm)具有较高的光电流贡献，这可能是由于PEDOT:PSS/n-Si异质结相较于MoO_x/n-Si异质结具有更高的质量，载流子复合速率较低。而在中长波段，PEDOT:PSS/n-Si太阳电池电流贡献相对较低，这是由于PEDOT:PSS薄膜在长波段具有较高的寄生吸收。

表1 PEDOT:PSS/n-Si和MoO_x/n-Si异质结TOPCon太阳电池光伏参数比较结果

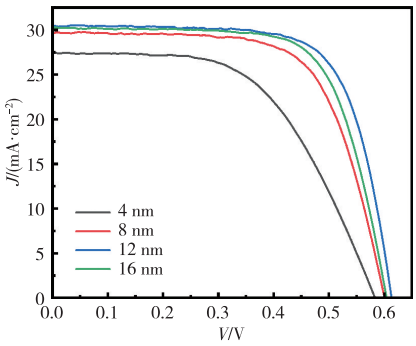
	制备PEDOT:PSS薄膜旋涂转速/(r/min)				MoO_x薄膜厚度/nm			
样品	1 000	1 500	2 000	2 500	4	8	12	16
V_{oc}/mV	592	598	574	528	586	598	610	604
J_{sc}/(mA·cm^{-2})	29.15	30.74	29.66	29.49	27.41	29.68	30.48	30.28
FF/%	69.97	72.32	62.59	57.64	55.32	66.81	70.80	69.4
PCE/%	12.07	13.29	10.66	8.97	8.89	11.86	13.16	12.69



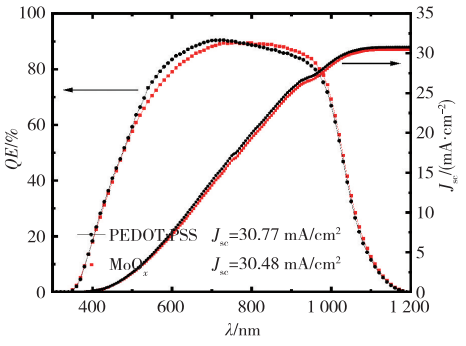
(a) 异质结太阳电池结构示意图



(b) PEDOT:PSS/n-Si异质结TOPCon太阳电池*J-V*曲线



(c) MoO_x/n-Si异质结TOPCon太阳电池*J-V*曲线



(d) 两种太阳电池冠军器件的外量子效率曲线

图4 两种材料用于太阳电池背面的器件结构示意图，以及其对应的J-V曲线和外量子效率曲线

通过对比MoO_x/n-Si和PEDOT:PSS/n-Si异质结TOPCon太阳电池的暗态电流密度-电压响应，研究两种器件的载流子传输特性，结果如图5所示。

图5(a)给出了半对数坐标系下，MoO_x/n-Si和PEDOT:PSS/n-Si异质结TOPCon太阳电池器件的暗态*J-V*曲线。可以看出，所有样品均表现出明显的整流行为，这表明在MoO_x/n-Si和PEDOT:

PSS/n-Si异质界面上均形成了高质量的P-N结。根据理想半导体电流密度-电压公式，拟合得到并联电导G_{SH}、串联电阻R_S、反向偏压下的饱和电流密度J_0和理想因子n。

$$J=J_0\left\{\exp\left[\frac{q}{nkT}(V-JR_S)\right]-1\right\}+\frac{V-JR_S}{R_{SH}} \quad (3)$$

式中，J_0是反向饱和电流，n是器件的理想因子，q是电荷，T是绝对温度，k是玻尔兹曼常数。公式(3)无法求解，但是可以通过一些近似算法提取相关参数[21]。忽略公式中的1，并假设R_S无穷大，公式(3)可以简化为：

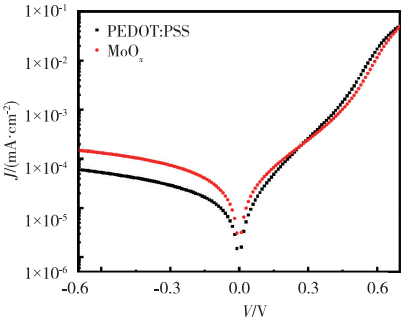
$$\frac{dV}{dJ}=R_S+\frac{AkT}{q}J^{-1} \quad (4)$$

通过绘制正向偏置区域的dV/dJ与J^{-1}的关系图得到R_S，如图5(c)所示。两种样品的R_S差异较小，这不会对器件性能造成明显影响。

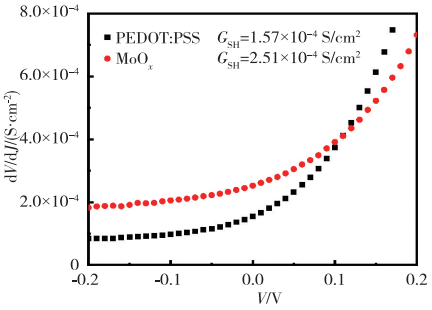
再重新排列公式(3)，可以得到：

$$\log\left(J-\frac{V-JR_S}{R_{SH}}\right)=\log\frac{J_0}{e}+\frac{q(V-JR_S)}{nkT}\log e \quad (5)$$

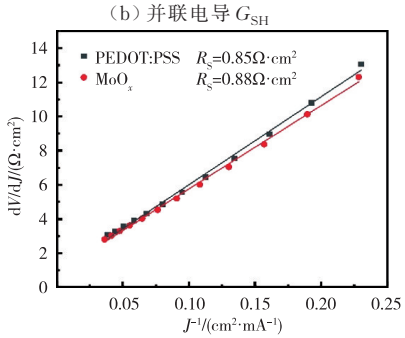
通过公式(5)可以获取器件的J_0和n。结果表明，PEDOT:PSS/n-Si异质结的$J_0=1.4\times10^{-6}$ A低于MoO_x/n-Si异质结(4.7×10^{-6} A)，如图5(d)所示。通过J-V曲线斜率计算法获得光伏器件的R_{SH}值，拟合dJ/dV-V曲线并且通过dJ/dV轴上的截距来提取G_{SH}值[19]。经过计算，PEDOT:PSS/n-Si异质结太阳电池的$G_{SH}=1.57\times10^{-4}$ S/cm^{2}和理想因子$n=1.46$，均低于MoO_x/n-Si异质结太阳电池($G_{SH}=2.51\times10^{-4}$ S/cm^2，理想因子$n=2.05$)，如图5(b)所示。这表明PEDOT:PSS/n-Si异质结具有更少的缺陷态密度，更低的载流子复合速率，这和EQE的测试结果相对应。较低的R_S、G_{SH}和缺陷态密度是PEDOT:PSS/n-Si异质结TOPCon太阳电池FF较高的原因。



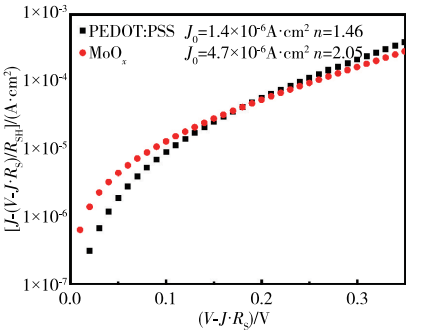
(a) 暗态J-V曲线



(b) 并联电导G_{SH}



(c) 串联电阻R_S



(d) 理想因子n和反向饱和电流密度J_0拟合曲线

图5　两种材料不同条件下用于太阳电池背面的暗态J-V、并联电导G_{SH}、串联电阻R_S，以及理想因子n和反向饱和电流密度J_0拟合曲线

虽然MoO_x缺陷态密度和G_{SH}低，但有着较高的开路电压，这是由于MoO_x具有较高的功函数，提供了更高的内建电场。内建电场可以通过C-V测试结果获得。为进行验证，对两种太阳电池进行C-V测试。根据Anderson的模型[22]，太阳电池的电容可以描述为：

$$1/C^2\propto(V_{bi}-V) \quad (6)$$

式中，C表示电容，V_{bi}是内建电场，V是外加电压。C-V测量结果以$1/C^2$-V的形式在图6中给出。通过拟合曲线在X轴上的截距提取到V_{bi}值，PEDOT:PSS/n-Si太阳电池的内建电场仅为659.1 mV，MoO_x/n-Si太阳电池的内建电场高达710.7 mV，因此MoO_x/Si太阳电池具有更高的开路电压，与光照J-V的测试结果相符。

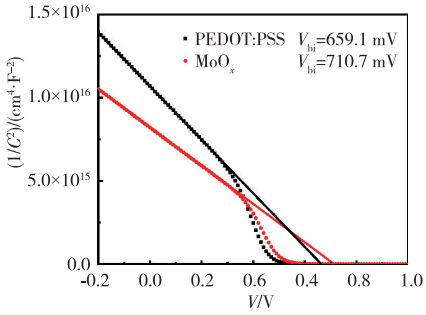


图6 MoO_x/n-Si和PEDOT:PSS/n-Si异质结TOPCon太阳电池的$1/C^2$-V图

对于太阳电池器件，环境稳定性也是评估其性能的重要参数。本工作将器件放置在室温和湿度高于40%的环境气氛中，测试了两种太阳电池的稳定性，各关键光伏参数随时间的变化规律如图7所示。其中PEDOT:PSS/n-Si异质结TOPCon太阳电池的各项光伏参数迅速劣化，在空气中存放32天之后，V_{oc}，J_{sc}下降了约50%，而FF，PCE衰减了近90%。这是由于长期曝露在空气中的PEDOT:PSS薄膜呈现几乎断开的PEDOT链，增加了PEDOT晶粒间的距离从而阻碍了电荷在高导电晶粒之间的跳跃，导致薄膜更差的导电性[4]。此外，PSS结构的吸湿性也是导致PEDOT:PSS变质的主要原因[23]。而MoO_x/n-Si异质结TOPCon太阳电池，在空气中存放32天后，其PCE，V_{oc}，FF均可保持90%以上的原值，J_{sc}基本保持不变。结果表明，MoO_x/n-Si异质结TOPCon太阳电池表现出更优异的稳定性。

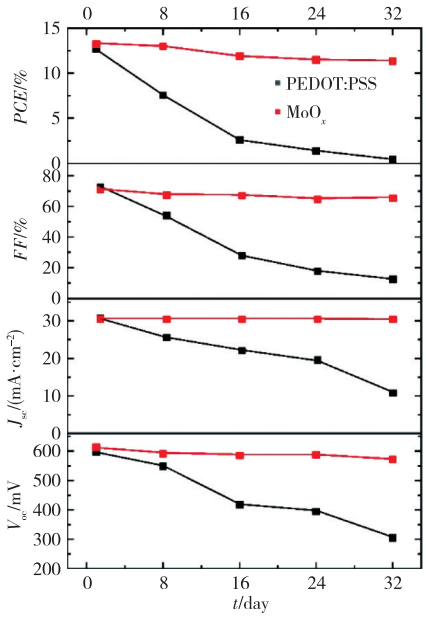


图7 MoO_x/n-Si和PEDOT:PSS/n-Si异质结TOPCon太阳电池的稳定性

3 结论

本文在晶硅衬底上制备PEDOT:PSS和MoO_x两种薄膜，比较PEDOT:PSS和MoO_x薄膜的光电性能及其在晶硅TOPCon太阳电池中的应用。电学方面MoO_x薄膜具有更高的功函数，而PEDOT:PSS薄膜具有更高的导电率。光学方面MoO_x薄膜相对于PEDDOT:PSS薄膜具有更低的寄生吸收且对硅片产生更优异的减反射作用。设计并制备了异质结在背面的全背电极PEDOT:PSS/n-Si和MoO_x/n-Si异质结太阳电池，比较了两种材料和硅结合形成的P-N结质量。通过优化实验条件分别获得最佳性能的太阳电池器件，冠军效率分别为13.28%和13.16%。通过量子效率、暗态J-V对两种异质结太阳电池冠军器件进行比较分析发现，两种太阳电池的R_S差别很小，PEDOT:PSS/n-Si异质结太阳电池有较低的J_0，G_{SH}和理想因子，而MoO_x/n-Si异质结太阳电池具有更高的内建电场V_{bi}。对两种电池的稳定性进行测试，MoO_x/n-Si异质结太阳电池有更好的稳定性。本工作为设计更具针对性的优化方案以提升非掺杂硅基异质结太阳电池性能提供了重要参考。对于MoO_x/n-Si异质结太阳电池，改善MoO_x薄膜和晶硅的界面接触是提升电池的转换效率的关键。对于PEDOT:PSS/n-Si异质结太阳电池，需要深入研究PEDOT:PSS的衰退机理并通过改性提高其稳定性。此外，应寻找合理增强其功函数的方法以提升转换效率。

参考文献：

[1] Bullock J, Hettick M, Geissbühler J, et al. Efficient silicon solar cells with dopant-free asymmetric heterocontacts [J]. Nature Energy, 2016, 1: 15031.

[2] 曾 蓉，陈 桐，张 雷，等. 氧化钼空穴传输层在有机太阳能电池中的研究进展[J]. 化工新型材料，2014，42(12)：220-222.
Zeng Rong, Chen Tong, Zhang Lei, et al. Progress of the molybdenum oxide as hole transport layer in organic solar cells [J]. New Chemical Materials, 2014, 42(12): 220-222.

[3] Shen X, Sun B, Liu D, et al. Hybrid heterojunction solar cell based on organic-inorganic silicon nanowire array architecture [J]. Journal of the American Chemical Society, 2011, 133(48): 19408-19415.

[4] He J, Gao P, Yang Z, et al. Silicon/organic hybrid solar cells with 16.2% efficiency and improved stability by formation of conformal heterojunction coating and moisture-resistant capping layer[J]. Advanced Materials, 2017, 29(15): 1606321.

[5] Groenendaal L, Jonas F, Freitag D, et al. Poly (3, 4-ethylenedioxythiophene) and its derivatives: past, present, and future[J]. Advanced Materials, 2000, 12(7): 481-494.

[6] Kirchmeyer S, Reuter K. Scientific importance, properties and growing applications of poly(3,4-ethylenedioxythiophene)[J]. Journal of Materials Chemistry, 2005, 15(21): 2077-2088.

[7] 孙佳琪，周春兰．PEDOT：PSS对PEDOT：PSS/Si杂化太阳电池性能影响的研究[J]．太阳能学报，2020，41(1)：146-153.
Sun Jiaqi, Zhou Chunlan. Effect of PEDOT：PSS on PEDOT：PSS/Si hybrid solar cell performance [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41(1): 146-153.

[8] Zhou W, Fan Q, Zhang Q, et al. High-performance and compact-designed flexible thermoelectric modules enabled by a reticulate carbon nanotube architecture [J]. Nature Communications, 2017, 8: 14886.

[9] Jäckle S, Liebhaber M, Gersmann C, et al. Potential of PEDOT：PSS as a hole selective front contact for silicon heterojunction solar cells [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 2170.

[10] 张丹霏，郑灵灵，马英壮，等．影响杂化钙钛矿太阳能电池稳定性的因素探讨[J]．物理学报，2015，64(3)：116-122.
Zhang Danfei, Zheng Lingling, Ma Yingzhuang, et al. Factors influencing the stability of perovskite solar cells[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(3): 116-122.

[11] 侯福华．钙钛矿太阳能电池空穴传输层的优化研究[D]．长春：中国科学院研究生院，2015.
Hou Fuhua. Optimization of hole transport layer in perovskite solar cells[D]. Changchun: Chinese Academy of Sciences, 2015.

[12] 刘西成，王德强，田　博，等．D-A型三芳胺空穴传输材料的合成及其在钙钛矿电池中的应用[J]．太阳能学报，2015，36(6)：1522-1527.
Liu Xicheng, Wang Deqiang, Tian Bo, et al. Synthesis of D-A type triarylamine hole transport material and application in perovskite cells[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2015, 36(6): 1522-1527.

[13] García-Hernansanz R, García-Hemme E, Montero D, et al. Transport mechanisms in silicon heterojunction solar cells with molybdenum oxide as a hole transport layer[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2018, 185: 61-65.

[14] 谷书辉．新型n型金属—绝缘层—半导体(MIS)太阳电池的研究[D]．天津：河北工业大学，2018.
Gu Shuhui. The study of new N-type metal-insulator-semiconductor (MIS) solar cells [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2018.

[15] Battaglia C, Yin X T, Zheng M, et al. Hole Selective MoO_x Contact for Silicon Solar Cells [J]. Nano Letters, 2014, 14(2): 967-971.

[16] Kumar M, Cho E C, Prodanov M F, et al. MoO_x work function, interface structure, and thermal stability analysis of ITO/MoO_x/a-Si (i) stacks for hole-selective silicon heterojunction solar cells[J]. Applied Surface Science, 2021, 553: 149552.

[17] 郑宇鹏，林归陆，高中亮，等．硅/有机杂化太阳电池中PEDOT:PSS改性的研究进展[J]．材料科学与工程学报，2021，39(5)：855-864.
Zheng Yupeng, Lin Guilu, Gao Zhongliang, et al. Research progress of the modification of PEDOT: PSS in silicon/organic hybrid solar cells[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2021, 39(5): 855-864.

[18] Zhang R, Hollars D R, Kanicki J. High efficiency Cu(In,Ga)Se_2 flexible solar cells fabricated by roll-to-roll metallic precursor co-sputtering method [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2013, 52(9R): 092302.

[19] Nirupama V, Uthanna S. Investigations on morphological and electrical studies of sputtered MoO_3 films [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2016, 27(4): 3668-3674.

[20] Battaglia C, Yin X, Zheng M, et al. Hole selective MoO_x contact for silicon solar cells[J]. Nano Letters, 2014, 14(2): 967-971.

[21] 姚　斌，胡　娟，张家永．钇掺杂对$Cu_2ZnSn(S,Se)_4$薄膜太阳电池性能的影响[J]．吉林师范大学学报(自然科学版)，2022，43(2)：1-10.
Yao Bin, Hu Juan, Zhang Jiayong. Influence of yttrium doping on performance of $Cu_2ZnSn(S, Se)_4$ based thin-film solar cell [J]. Journal of Jilin Normal University: Natural Science Edition, 2022, 43(2): 1-10.

[22] Mu X, Yu X, Xu D, et al. High efficiency organic/silicon hybrid solar cells with doping-free selective emitter structure induced by a WO_3 thin interlayer[J]. Nano Energy, 2015, 16: 54-61.

[23] Liu Q, Ishikawa R, Funada S, et al. Highly efficient solution-processed poly (3, 4-ethylenedio-xythiophene) : poly (styrenesulfonate)/crystalline-silicon heterojunction solar cells with improved light-induced stability [J]. Advanced Energy Materials, 2015, 5(17): 1500744.

作者简介：

王嘉文(1999—)，男，山西省晋城市人，硕士，主要研究方向为二维半导体材料光伏器件；

崔义乾(1991—)，男，河北省廊坊市人，博士，讲师，主要研究新型高效太阳能电池的制备；

张　瑜(1991—)，女，河北省石家庄市人，博士，讲师，主要研究方向为新型光电材料与器件，二维半导体材料光伏与储能；

于　威(1965—)，男，河北省保定市人，博士，教授，主要从事低维纳米光电功能材料、新型高效光伏器件等方向的研究。