

doi:10.3788/gzxb20184712.1223002

氧化镁层对石墨烯/硅太阳能电池的界面优化

赵建江¹, 徐明生²

(1 浙江大学 材料科学与工程学院 硅材料国家重点实验室, 杭州 310027)

(2 浙江大学 信息与电子工程学院 硅材料国家重点实验室, 杭州 310027)

摘 要:为了探究石墨烯/硅太阳能电池的铝/硅背接触特性,采用连续蒸镀的方法在铝/硅背接触间插入一层氧化镁介质层,对比测试具有不同厚度氧化镁层的电池的电流-电压特性、外量子效应、电池的串联电阻以及背接触电阻。研究表明:随着氧化镁厚度的增加,电池的光电转换效率、串联电阻以及背接触电阻存在先增大后降低的趋势,当氧化镁的厚度为 1 nm 时的光电转化效率最优,达到 5.53%,厚度为 0 nm 时,光电转换效率为 2.90%;当氧化镁的厚度为 0 nm 和 1 nm 时,相应的串联电阻(背接触电阻)分别为 4.1 Ω (9.6 Ω)和 1.8 Ω (3.2 Ω)。

关键词:石墨烯;硅;太阳能电池;界面优化;氧化镁

中图分类号:TK513

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)12-1223002-7

Interface Engineering of Graphene/silicon Solar Cells by Introducing an Ultrathin Magnesium Oxide Interlayer

ZHAO Jian-jiang¹, XU Ming-sheng²

(1 State Key Lab of Silicon Materials, School of Material Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(2 State Key Lab of Silicon Materials, College of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to investigate the characteristics of the back-side surface, *i.e.*, Al/Si, of graphene/Si solar cells, a ultra-thin magnesium oxide interlayer with various thickness between the Al electrode and the silicon substrate was prepared by using a successive thermal evaporation deposition technology. The current-voltage curves, external quantum efficiency, series resistance, and back contact resistance of the graphene/Si solar cells with different thickness of the magnesium oxide interlayer were measured. The results show that the photoelectric conversion efficiency, series resistance and back contact resistance increased first and then decreased with the increase in the magnesium oxide thickness, and the device performance is best when the thickness of magnesium oxide layer is 1 nm. The photoelectric conversion efficiency, series resistance and back contact resistance of the solar cells with 0 nm and 1 nm MgO are 2.90%, 4.2 Ω , 9.6 Ω , and 5.53%, 1.8 Ω , 3.2 Ω .

Key words: Graphene; Silicon; Solar cell; Interface engineering; MgO

OCIS Codes: 230.0250; 160.5140; 230.2090; 310.6845; 310.1620

0 引言

近年来,能源危机激发了全世界范围内对新能源材料及其器件的研究热潮。太阳能作为一种取之不尽,用之不竭的清洁能源,得到了广泛关注.目前在光伏市场上占据主导地位的是晶硅太阳能电池,其具有资源

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 51472219, 51672244)和国家国际合作专项(No. 2013DFG52800)资助

第一作者:赵建江(1982-),男,工程师,硕士,主要研究方向为光纤光栅传感技术. Email: zjjiang@zju.edu.cn

通讯作者:徐明生(1972-),男,教授,博士,主要研究方向为半导体材料与器件. Email: msxu@zju.edu.cn

收稿日期:2018-07-09;录用日期:2018-09-03

<http://www.photon.ac.cn>

丰富、性能稳定的优点.传统的硅基 p-n 结太阳能电池受限于复杂的制备工艺和环境污染、高能耗等问题,生产成本较高,限制了硅基 p-n 结太阳能电池的发展.相比之下,硅基肖特基结太阳能电池制备更为简单,具有一定的优势.这种器件往往通过在硅表面制备很薄的金属薄膜获得,但这种金属薄膜表面反射率较高,会导致较大的入射光损失和较差的器件性能.

石墨烯(Gr)是蜂窝状单一 sp^2 杂化的碳原子层,其载流子迁移率高,薄膜导电性好,且在可见光区光的吸收仅为 2.3%.石墨烯优异的光电性能使它作为一种理想的材料应用于各种光电器件^[1],特别是用于制备硅基肖特基结太阳能电池^[2].2010年,Wu 研究组首次报道了石墨烯/硅(n型)肖特基结太阳能电池,并获得了 1.65%的光电转换效率(Power Conversion Efficiency, PCE)^[3].经过几年的努力,石墨烯/硅(Gr/Si)太阳能电池的效率纪录已达 15.6%,具有一定的应用前景^[4].目前,对石墨烯/硅太阳能电池的研究主要集中于器件的前表面(Gr/Si界面),包括化学掺杂石墨烯^[5]、硅表面钝化^[6]、Gr/Si界面能带优化^[7-8]、减反射工艺^[9-10]等几个方面,而对器件背面电接触的优化则很少.包括石墨烯/硅太阳能电池,一些常见的 n 型硅基肖特基结太阳能电池(如碳纳米管/硅(CNT/Si))的背电极一般使用铟-镓(In-Ga)合金刮涂或蒸镀的铝(Al)膜.前者毒性大不适合应用^[9,11],而 Al/Si 则并不是一个理想的欧姆接触,其肖特基势垒为 0.5 eV 左右^[12],对光生电子的收集具有阻碍作用,同时导致载流子在背面复合.Zhang 等在硅背面旋涂一层碳酸铯(CS_2CO_3)薄膜以改善 Al/Si 接触^[13],这层 CS_2CO_3 薄膜起到修饰电极的作用,可显著降低 Al 的功函数,从而抑制 Al/Si 肖特基势垒的形成;使用 CS_2CO_3 修饰后,他们制备的 PEDOT/n-Si 肖特基结太阳能电池效率由 10.8% 提升至 13.7%.氟化锂(LiF)薄膜也具有类似的作用,并且制备工艺更为简单,与 Al 连续蒸镀即可^[14,15],这种修饰层一般通过其金属离子与电极(Al)间的相互作用来实现电极功函数的调控.然而,由于其绝缘性,这种修饰层的厚度需精细控制,如据报道 LiF 层的最优厚度为 0.5 nm,这就增大了工艺难度^[16].另一种策略是利用电介质薄膜在电场下的极化来调控界面(Al/Si)上的能级分布,从而降低肖特基势垒,该方法被广泛应用于发光二极管(LED)的研究中^[17].然而,考虑到太阳能电池一般工作在较低的电压下(<1 V),其工作环境与 LED 存在差异,这也对介质层材料的选择以及介质层的制备提出了更高的要求.本文用蒸镀法制备了氧化镁(MgO)介质层,以改善 Al/Si 电接触从而优化石墨烯/硅太阳能电池.使用 MgO 层,器件效率由 2.90% 提升至 5.53%,经化学掺杂(无减反层)后效率为 8.62%,为石墨烯/硅太阳能电池的性能优化提供了新思路.

1 实验

1.1 硅片处理、单层石墨烯薄膜的制备与转移

本文使用 n 型 $\langle 100 \rangle$ Cz 硅片($400 \mu\text{m}$, $1\sim 10 \Omega\text{cm}$)制备 Gr/Si 太阳能电池.首先使用紫外/臭氧清洗机处理 15 min 去除硅表面沾污;然后在去离子水中超声清洗 5 min.用稀释的氢氟酸(2%)去浸泡硅片,除去表面较厚的氧化层,用去离子水洗净,最后用氮气吹干.对上述去除氧化层的硅片静置 1.5 h 使硅表面形成一层薄的自然氧化层(SiO_x).

使用低压化学气相沉积(Low-Pressure Chemical Vapor Deposition, LPCVD)的方法,以甲烷(20 sccm)为碳源,氢气为还原气体(40 sccm)在铜箔上生长单层的石墨烯薄膜.具体步骤如下:先将厚度为 $50 \mu\text{m}$ 的铜箔经过电化学处理,然后放入 LPCVD 石墨烯制备的石英管中在 Ar(100 sccm)和氢气(40 sccm)于 1000°C 进行热处理 30 min;铜箔处理后,在已有的气氛中加入甲烷气体(20 sccm)于温度 1000°C 制备石墨烯,制备时间约 20 min,制备过程保持气压为 25 Pa.石墨烯的转移使用目前广泛使用的湿法转移工艺,首先在石墨烯上旋涂一层聚甲基丙烯酸酯(Polymethyl Methacrylate, PMMA)薄膜; 100°C 烘干后,用紫外/臭氧清洗机对铜箔背面处理 10 min 以去除背面生长的石墨烯.随后用过硫酸铵($(NH_4)_2S_2O_8$)溶液将铜腐蚀掉,并用去离子水将石墨烯漂洗数次,留下漂浮于水面的 PMMA/Gr 薄膜待用.使用上述处理的硅片将石墨烯从水中捞出,室温晾干,放入热处理炉 400°C (氮气气氛)处理 1 h 去除石墨烯表面的 PMMA.

使用喇曼光谱(Raman, Blucke)、紫外-可见光吸收光谱(UV-vis, Hitachi)和四探针测试仪(Hall, LakeShore7700A)表征石墨烯薄膜的光学及电学性能.喇曼光谱激光波长为 532 nm,测试的样品为氧化硅衬底上的石墨烯.

1.2 石墨烯/硅太阳能电池的制备与表征

将转移有石墨烯的硅片样品置于高真空下(10^{-3} Pa),依次采用热蒸镀方法蒸镀 MgO 介质层和 Al 背电

极(约 30 nm).MgO 介质层名义厚度通过校准后的石英晶体膜厚仪示数获得.电池的前电极用导电银浆沿石墨烯膜轮廓线涂覆一周制得.在测试电池光电性能时需将银电极用胶带彻底覆盖避免额外的光入射.石墨烯的化学掺杂使用硝酸实现:将制备好的电池样品置于浓硝酸上方约 1 min,硝酸蒸汽将吸附于石墨烯上并与石墨烯发生电荷转移,实现石墨烯 p 型掺杂.太阳能电池最关键的工作参数即为 PCE,可通过测量光照下电池的电流密度-电压(J - V)曲线获得.光照下,太阳能电池的 J - V 曲线与两条坐标轴的交点分别为开路电压(V_{oc})点和短路电流密度(J_{sc})点.光照下,太阳能电池的输出功率达到最大时,对应 J - V 曲线上的最大功率点,该点对应的电压和电流分别称为最大功率电压 V_m 和最大功率电流 J_m .填充因子(Fill Factor, FF)被定义为太阳能电池的最大输出功率与开路电压和短路电流之积的比值($FF = V_m J_m / V_{oc} J_{sc}$).石墨烯/硅太阳能电池的光电性能测试包括明场与暗场的 J - V 特性曲线测试(Keithley 2400)和外量子效率(External Quantum Efficiency, EQE)测试(QEX10, PV Measurements),电池的光电转换效率在标准太阳光源下(AM1.5G)测得.

2 实验结果与讨论

图 1(a)为石墨烯的喇曼光谱,可观察到明显的 G 峰($\sim 1590\text{ cm}^{-1}$)和 2D 峰($\sim 2700\text{ cm}^{-1}$).峰强比 $I_{2D}/I_G \approx 2.6$,表明研究使用的石墨烯薄膜为单层的石墨烯.而石墨烯的另一特征峰 D 峰($\sim 1350\text{ cm}^{-1}$)强度极低,表明该石墨烯样品质量较好,缺陷含量低.同时测得石墨烯方块电阻约 $500\ \Omega/\text{sq}$.石墨烯的透光性如图 1(b)的透过率谱,在可见光范围内,石墨烯具有约 95% 的透光性.测试结果说明研究使用的石墨烯具有比较优良的电学和光学性能,适用于制备石墨烯/硅太阳能电池^[17].

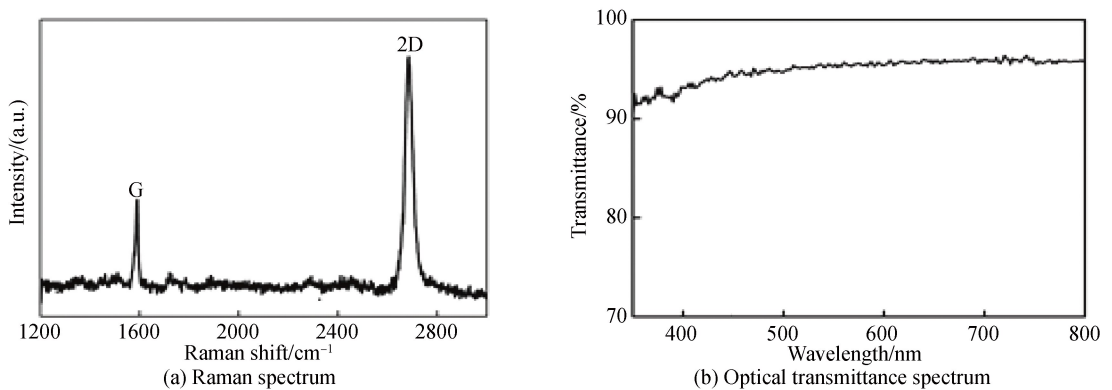
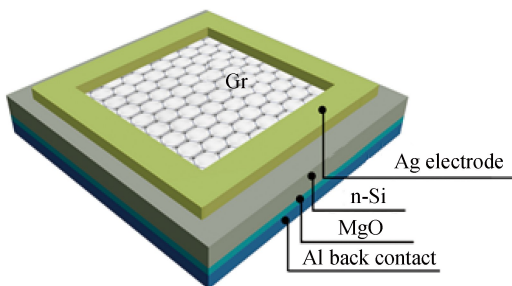


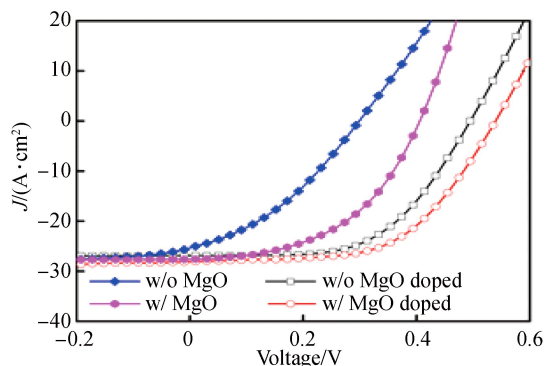
图 1 石墨烯光学特性

Fig.1 Optical properties of synthesized graphene

使用 MgO 介质层优化的 Gr/Si 太阳能电池器件结构见图 2(a).表 1 为使用不同厚度(0~1.5 nm)的 MgO 介质层的器件的光伏性能数据,可以看出随着 MgO 厚度不同,光伏特性有很大的差异,随 MgO 厚度增加而光伏特性提高;进一步增加 MgO 厚度,导致光伏特性变差,变差的原因可能是更厚的 MgO 导致电阻增加,可从降低的短路电流数据分析可知.研究发现,在 MgO 厚度为 1 nm 时器件的综合性能最佳.可见,引入 MgO 介质层使 Gr/Si 太阳能电池效率从低于 3% 显著提高至 5.53%,其中电池的 V_{oc} 提高约 100 mV; J_{sc} 上升了 $0.6\sim 2.3\text{ mA}/\text{cm}^2$,FF 与短路电流呈现相同的趋势.



(a) Schematic device structure of Gr/Si solar cell



(b) Illuminated J - V curves

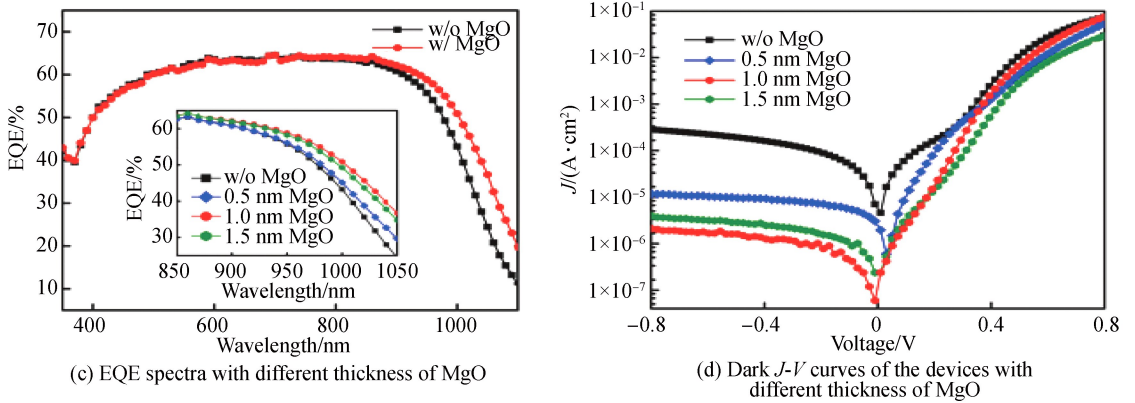


图2 太阳能电池性能表征

Fig.2 Properties of solar cells with different thickness of MgO interlayer

表1 不同厚度 MgO 介质层对 Gr/Si 电池光伏性能的影响

Table 1 Photovoltaic performance of Gr/Si solar cells as a function of thickness of the MgO interlayer

Thickness of MgO interlayer/nm	V_{oc}/mV	$J_{sc}/(mA \cdot cm^{-2})$	FF/%	PCE/%
0	299	25.4	36.2	2.75
	322	25.2	35.7	2.90
	322	25.2	35.5	2.87
0.5	391	25.9	35.4	3.58
	366	26.7	37.7	3.69
	396	26.2	38.0	3.94
1.0	406	27.6	49.4	5.53
	423	27.5	45.1	5.23
	419	27.6	42.7	4.94
1.5	412	26.3	41.6	4.52
	415	26.4	39.9	4.37
	421	27.2	40.9	4.69

由所测石墨烯的方块电阻可知,研究的石墨烯其导电性能并不理想,为了改善石墨烯的导电性能,对石墨烯进行 HNO_3 化学掺杂 (doping), 以提高石墨烯的功函数.图 2(b) 为使用 1 nm MgO 介质层和不使用 MgO 介质层的 Gr/Si 电池光场 $J-V$ 曲线比较,经化学掺杂后,电池的效率分别提升至 8.62% 和 7.57%;结果表明:无论对石墨烯进行掺杂与否,使用 MgO 介质层都能够显著提高电池的光电转换效率.

使用外量子效率和暗场 $J-V$ 曲线对太阳能电池性能变化作进一步分析.如图 2(c) 和 2(d) 所示,对波长小于 800 nm 的光子,所有电池的外量子效率基本相同;但是,当引入 MgO 介质层后,器件在大于 800 nm 波段的外量子效率得到明显提高,并随 MgO 厚度有先增加后减少的趋势,这与 J_{sc} 以及光电转换效率的变化吻合.Gr/Si 太阳能电池的暗场正向电流 J 可表示为^[18]

$$J = J_0 [\exp(qV/nkT) - 1] \quad (1)$$

式中, J_0 为器件的反向饱和电流, q 为电子电荷, n 为二极管理想因子, k 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度.在半对数坐标下,对正向暗电流曲线上线性部分作切线,其斜率即为器件的二极管理想因子,这条切线在 y 轴的截距为反向饱和电流.

由图 2(d) 可知,引入 MgO 介质层可显著改善 Gr/Si 太阳能电池的暗场特性: n 值从 2.07 逐渐降至 1.61 (1 nm MgO), 表明器件具有更好的整流特性;对应地, J_0 从 $2 \times 10^{-6} A/cm^2$ 降至 $2 \times 10^{-7} A/cm^2$, 下降了一个数量级.光子的波长越长,其在 Si 中的吸收深度越深;而对于短波长光子而言,吸收深度较小,其产生的光生电子-空穴对处于 Si 表面附件的内建电场范围内,在内建电场作用下能够迅速分离成电子和空穴.而对于波长较长的光子,因其吸收深度较深,其产生的光生电子-空穴对可能存在于内建电场范围以外,这些光生载流子通过扩散有一定的机率达到太阳能电池的背面而发生复合,从而导致光生载流子损失.研究中使用的

MgO 介质层时,长波长段的 EQE 相对于没有 MgO 介质层的电池有所提高以及反向饱和电流的降低均说明电池中的载流子复合得到显著抑制;抑制载流子复合意味着提高了电子和空穴的浓度,不仅有助于提高 FF,还可提高 V_{oc} ^[18-19].

串联电阻(R_s)对太阳能电池中的载流子输运有关,本研究引入 MgO 介质层对电池的改变仅是在 Si/Al 界面,因此 MgO 介质层对 Si/Al 界面欧姆接触的改善是降低电池 R_s 的主要原因.为了证明该推论,图 3(a) 比较了不同厚度 MgO 介质层对 Gr/Si 太阳能电池串联电阻的影响. R_s 可通过式(2)求出^[12]

$$\frac{dV}{d \ln J} = R_s J + \frac{nkT}{q} \quad (2)$$

R_s 可从曲线 $\frac{dV}{d \ln J} \sim J$ 的斜率得到.

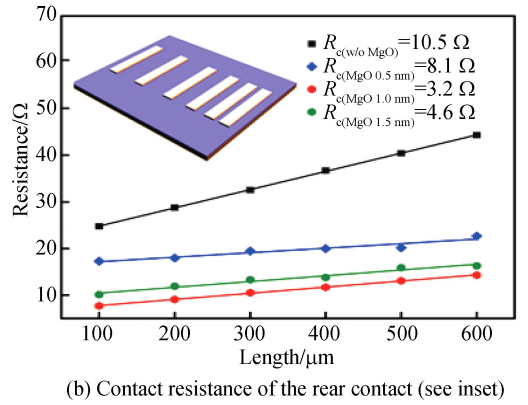
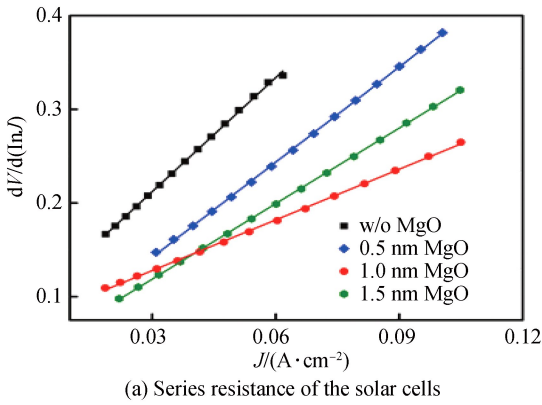


图 3 MgO 层对太阳能电池电阻的影响

Fig.3 Influence of thickness of MgO interlayer on resistances of solar cells

从图 3(a) 计算可知,随 MgO 厚度增加(0,0.5,1.0,1.5 nm),器件 R_s 分别为 4.1,3.4,1.8 和 2.7 Ω/cm^2 . 即随着 MgO 厚度的增加, R_s 先降低,这可通过 MgO 介质层引起的 Al/Si 肖特基势垒降低来解释;但是随着 MgO 厚度的进一步增大,Gr/Si 电池的串联电阻将重新增加.

图 3(b) 为使用传输线(TLM)原理测得的 Al/Si 间接触电阻(R_c),图 3(b)的内嵌图为测试 R_c 所用器件示意图,图中 Al 电极两两间距为 100,200,⋯,600 μm ,测试时每次连接相邻的两个电极计算电阻,获得的电阻 R_{tot} 可表示为^[20]

$$R_{tot} = R_{bulk} + 2R_c \quad (3)$$

式中, R_{bulk} 为两电极间硅的体电阻,与电极间距呈线性关系,因而可通过线性拟合扣除 R_{bulk} .

由式(3)求得使用 1 nm 厚的 MgO 介质层时,Al/MgO/Si 间的接触电阻降至为 3.2 Ω ,为 Al/Si 直接接触时的 1/3,表明一定厚度的 MgO 介质层可改善 Al/Si 接触,降低 Al/Si 间的肖特基势垒,从而提高 Gr/Si 太阳能电池的性能.

图 4 比较了引入 MgO 介质层前后 Gr/Si 太阳能电池背面一侧的能带结构.对于无 MgO 介质层的器件[图 4(a)],Al/Si 直接接触产生了一定的肖特基势垒 ϕ_B .这一势垒会阻碍电子被 Al 电极收集,同时将吸引界面附近的空穴至 Al 电极与电子复合.当石墨烯/硅太阳能电池处于正向偏置,MgO 介质层被极化,部分电压将降落于 MgO 上,使得界面上的肖特基势垒降低 $\Delta\phi_B$ ^[16].在此情形下,界面附近的

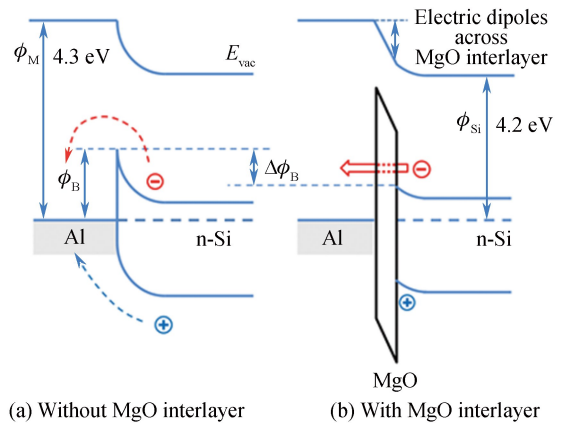


图 4 石墨烯/硅太阳能电池背接触界面的能带示意图
Fig.4 Schematic band structures of at rear contact of Gr/Si solar cells

电子能更容易地越过势垒,并隧穿至 Al 电极;同时,界面附近能带弯曲减弱,抑制了空穴向 Al 电极一侧移动.因此,引入 MgO 介质层可促进器件对电子的收集,并抑制空穴扩散至背面引起的载流子复合,与前述观测结果吻合.由于光子在硅中的吸收深度不同,扩散至硅背面的空穴主要由长波段光子产生(远离 Gr/Si 内建电场,不易分离),这也解释了具有 MgO 介质层的 Gr/Si 太阳能电池的在长波段范围的外量子效率提高的原因.而 Gr/Si 太阳能电池经化学掺杂后,石墨烯功函数上升,内建电场增强,耗尽区展宽.在这种情况下,将有更多的光生载流子得到有效分离,因此 MgO 介质层对电池效率的提升效果在使用化学掺杂后有所弱化,但仍能观察到显著差异[见图 2(b)].改善 Gr/Si 太阳能电池的光伏性能是一个系统工程,通常制备的单层的石墨烯的方块电阻在 500 Ω/sq 以上,同时,转移石墨烯制备电池等器件制备过程往往会引入杂质与缺陷,从而进一步增加石墨烯层的方块电阻,影响器件的串联电阻;另一方面,本征石墨烯的功函在 4.6~4.8 eV 左右,其与硅形成的肖特基势垒可达到 0.7 eV,这样电子容易越过肖特基势垒而与空穴复合,这些因素都影响电池的性能.采用一些具有较强氧化性的物质如 HNO_3 对石墨烯进行掺杂,可实现电荷转移,达到 p 型掺杂石墨烯,既提高了石墨烯的导电能力,又能改善石墨烯的功函;不过这类化学掺杂的器件稳定性较差^[21].调控 MgO 介质层的厚度对器件性能的影响表现为两个方面^[16],首先,随 MgO 介质层厚度增加,将有更多的电压降落在 MgO 上,Al/Si 界面上的肖特基势垒进一步降低($\Delta\phi_B$ 增大),则有更多的电子能够越过势垒;另一方面,电子隧穿通过 MgO 介质层的效率将随 MgO 厚度增加而降低.实际流过 Al/MgO/Si 界面的电流受上述两个因素的共同作用:当 MgO 厚度小于 1 nm 时,界面处电子的收集主要受界面肖特基势垒限制,而大于 1 nm 时则受隧穿效率限制.由此可知 MgO 介质层的厚度存在最优值 1 nm,并与 J_0 、EQE、 R_s 等参数的变化趋势一致.上述研究表明:MgO 介质层的功能以及性能提升的机理与其它界面改性层如 LiF 等类似,且都可以连续通过热蒸镀制备^[14-15],但 LiF 作为界面层存在 Li 离子向器件其它部位扩散的现象,会影响器件的稳定性.

3 结论

研究了 Gr/Si 太阳能电池背面电极 Al/Si 的界面层 MgO 对背面电接触的影响.结果表明:在 Al/Si 界面引入 MgO 介质层能够显著提高太阳能电池的光伏性能,其机理为 MgO 层降低了 Al/Si 间的肖特基势垒,从而促进背面电子的收集,并抑制空穴引起的载流子的复合.同时发现不同厚度的 MgO 介质层影响背面电子收集效率,这种收集主要由隧穿机制决定,当 MgO 厚度为 1 nm 时,太阳能电池性能最好,分别由 2.90% 提升至 5.53%(无掺杂),由 7.57% 提升至 8.62%(经硝酸化学掺杂).可见,引入 MgO 电介质材料能够优化界面,有助于提高 Gr/Si 太阳能电池性能,为实现高效低成本的光伏器件提供了新思路;结合器件工程,有望推进低成本硅基光伏的发展.

参考文献

- [1] YE Neng, YAN Jie-ling, XIE Shuang, *et al.* Silver nanowire-graphene hybrid transparent conductive electrodes for highly efficient inverted organic solar cells[J]. *Nanotechnology*, 2017, **28**(30): 305402.
- [2] BARTOLOMEO D A. Graphene Schottky diodes: An experimental review of the rectifying graphene/semiconductor heterojunction[J]. *Physics Reports*, 2016, **606**(1): 1-58.
- [3] LI Xin-ming, ZHU Hong-wei, WANG Kun-lin, *et al.* Graphene-on-silicon schottky junction solar Cells[J]. *Advanced Materials*, 2010, **22**(25): 2743-2750.
- [4] SONG Yi, LI Xin-ming, Mackin C, *et al.* Role of interfacial oxide in high-efficiency graphene-silicon Schottky barrier solar cells[J]. *Nano Letters*, 2015, **15**(3): 2104-2110.
- [5] MIAO Xiao-chang, TONGAY S, PETERSON M K, *et al.* High efficiency graphene solar cells by chemical doping[J]. *Nano Letters*, 2012, **12**(6): 2745-2750.
- [6] ZHANG Xiao-zhen, XIE Chao, JIE Jian-sheng, *et al.* High-efficiency graphene/Si nanoarray Schottky junction solar cells via surface modification and graphene doping[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2013, **1**(22): 6593-6601.
- [7] XIE Chao, ZHANG Xiao-zhen, WU Yi-ming, *et al.* Surface passivation and band engineering: a way toward high efficiency graphene-planar Si solar cells[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2013, **1**(30): 8567-8574.
- [8] XU Di-kai, YU Xue-gong, GAO Da-ce, *et al.* Room-temperature processed, air-stable and highly efficient graphene/silicon solar cells with an organic interlayer[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2016, **4**(29): 11284-11291.
- [9] XIE Chao, ZHANG Xiu-juan, RUAN Kai-qun, *et al.* High-efficiency, air stable graphene/Si micro-hole array Schottky junction solar cells[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2013, **1**(48): 15348-15354.
- [10] LIAO Tong-qing, WEI Xiao-long, WU Sheng, *et al.* Reduction of reflected light from silicon solar cells through

- spherical optical micro/nano-structure[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(1): 0116001.
- 廖同庆,魏小龙,吴昇,等.利用球型微纳米颗粒结构表面减小硅基太阳能电池的光反射[J]. *红外与激光工程*, 2016, **45**(1):0116001.
- [11] MU Xin-hui, YU Xue-gong, XU Di-kai, *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.
- [12] CARR B A, FRIEDLAND E, MALHERBE J B. Effect of annealing on the Schottky barrier height of Al/n-Si Schottky diodes after Ar^+ ion bombardment[J]. *Journal of Applied Physics*, 1988, **64**(9): 4775-4777.
- [13] ZHANG Yun-fang, CUI Wei, ZHU Ya-wen, *et al.* High efficiency hybrid PEDOT:PSS/nanostructured silicon Schottky junction solar cells by doping-free rear contact[J]. *Energy & Environmental Science*, 2015, **8**(1): 297-302.
- [14] ZHANG Yun-fang, LIU Rui-yuan, LEE Shuit-tong, *et al.* The role of a LiF layer on the performance of poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate)/Si organic-inorganic hybrid solar cells[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **104**(8): 083514.
- [15] XU Di-kai, YU Xue-gong, ZUO Li-jian, *et al.* Interface engineering and efficiency improvement of monolayer graphene-silicon solar cells by inserting an ultra-thin LiF interlayer[J]. *RSC Advances*, 2015, **5**(58): 46480-46484.
- [16] CHOI H W, KIM S Y, KIM W K, *et al.* Enhancement of electron injection in inverted top-emitting organic light-emitting diodes using an insulating magnesium oxide buffer layer[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, **87**(8): 082102.
- [17] KIM Y E, PARK H, KIM J J. Enhanced quantum efficiency in polymer electroluminescence devices by inserting a tunneling barrier formed by Langmuir-Blodgett films[J]. *Applied Physics Letters*, 1996, **69**(5): 599.
- [18] BRUNA M, OTT A K, IJAS M, *et al.* Doping dependence of the Raman spectrum of defected graphene[J]. *ACS Nano*, 2014, **8**(7): 7432-41.
- [19] YANG Li-fei, YU Xue-gong, XU Ming-sheng, *et al.* Interface engineering for efficient and stable chemical-doping-free graphene-on-silicon solar cells by introducing a graphene oxide interlayer[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2014, **2**(40): 16877-16883.
- [20] REEVES G K, HARRISON H B. Obtaining the specific contact resistance from transmission line model measurements [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 1982, **3**(5): 111-113.
- [21] CUI Tong-xiang, LV Rui-tao, HUANG Zheng-hong, *et al.* Enhanced efficiency of graphene/Si heterojunction solar cells by molecular doping[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2013, **1**(18): 5736-5740.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 51472219, 51672244) and the Program for 14th China-Japan S&T Cooperation (No.2013DFG52800)

引用格式: ZHAO Jian-jiang, XU Ming-sheng. Interface Engineering of Graphene/silicon Solar Cells by Introducing an Ultrathin Magnesium Oxide Interlayer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(12): 1223002

赵建江,徐明生. 氧化镁层对石墨烯/硅太阳能电池的界面优化[J]. *光子学报*, 2018, **47**(12):1223002.