

a-C: Fe/AlO_x/Si 基异质结的光伏效应*吴利华 章晓中[†] 于奕 万蔡华 谭新玉

(先进材料教育部重点实验室, 清华大学材料科学与工程系, 北京 100084)

(2010年5月4日收到; 2010年6月11日收到修改稿)

使用脉冲激光沉积(PLD)依次沉积氧化铝和碳膜制备了 a-C: Fe/AlO_x/Si 基异质结, 研究了其光伏效应及其在太阳能电池上的应用. 该太阳能电池在标准日光照射 (AM1.5, 100 mW/cm²) 下, 可获得 0.33 V 的开路电压和 4.5 mA/cm² 的电流密度, 太阳能电池的转换效率为 0.35%. 通过 C-V 测量, 证明了氧化铝层的引入降低了界面能级数目, 增加了界面势垒高度. 界面能级数目降低减少了光生载流子在界面复合的概率, 有利于光电流和光电压的产生.

关键词: 光伏效应, 非晶碳膜, 异质结, 氧化铝

PACS: 78.56.-a, 78.66.Jg, 73.40.Lq

1. 引言

目前太阳能电池市场仍是以硅材料为主的半导体结构的太阳能电池, 但是它的成本依然较高^[1-5], 不利于日常生活应用. 另外, Si 材料在光照下退化限制了其寿命及稳定性^[6]. 因此, 寻求新的材料或对其进行改进, 找到一种新的成本低的清洁能源迫在眉睫^[4-9]. 碳材料由于其和 Si 材料结构相近, 稳定性好, 成本低廉而颇受关注. 碳材料是一种潜在的低成本且有较高效率的太阳能电池材料. 碳材料的结构多样, 可以是绝缘的金刚石、呈现导体或半导体性质的碳纳米管以及表现为金属性的石墨^[5].

类金刚石的碳膜强度一般很高, sp³ 杂化比例很高, 根据沉积条件的不同, 薄膜可以是完全非晶的或者包含有金刚石微晶或石墨团簇. 未掺杂的碳膜电导比较低, 一般表现为弱 p 型半导体; 通过掺杂 P^[10], B^[11] 和铁磁金属^[12,13] 等可以改善其半导体性, 获得 p 型或 n 型半导体. 这种可控的输运性质使其在光电子器件上有应用前景. 另一方面, 非晶碳膜可以作为常规 Si 太阳能电池的防反射层来提高太阳能电池的效率^[5]. 富勒烯 (C₆₀) 由于其具有直

接能带结构, 允许电子在价带和导带传输而不产生声子的特性, 使其在有机太阳能电池上作为非常有潜力的电子接收和输运的材料. 碳纳米管也具有直接能带结构, 且带隙反比于纳米管的直径. 对于单个碳纳米管, 多重能带可以参与光电输运; 当组合使用不同直径和螺旋度的碳纳米管 (相应的不同的带隙), 有可能获得连续的宽的光谱响应. 光子激发的自由电子-空穴对可以被外加电场^[14] 和肖特基势垒区、p-N 结势垒区或缺陷态的内建电场分开^[15,16], 因此产生了光电流或光电压. 另外, 碳纳米管的薄膜也表现出光伏效应. 半导体性的碳纳米管也被引入到具有共轭结构的聚合物来制备有机太阳能电池^[17]. 最近, CNTs/Si 异质结在太阳能电池上的应用也得到了广泛研究^[18,19]. 多壁碳纳米管/重掺杂 p 型硅异质结表现出 I-V 的整流效应; 单壁碳纳米管薄膜/硅异质结也可以和硅基底形成肖特基接触, 在大偏压下表现出大的光电流和暗电流之比; 基于双壁碳纳米管/n 型硅异质结的太阳能电池被开发出来, 主要是利用了双壁碳纳米管薄膜的高的电导率和透光性的特点, 最初的测试得到了 AM1.5 光照条件 (100 mW/cm²) 下 5%—7% 的转换效率^[20]. 石墨烯 (graphene) 对光是高度透明的, 仅吸收 2.3% 的入射白光^[5]. Armchair 结构的石墨烯纳米带可以是

* 国家自然科学基金委-广东联合基金重点项目 (批准号: U0734001), 国家自然科学基金 (批准号: 50772054), 973 计划前期研究专项 (批准号: 2008CB617601) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: xzzhang@tsinghua.edu.cn

金属性的或半导体性的,其带隙可以通过调整其宽度来调控.这些优异的电性质使石墨单层可在未来的光电子器件上得到应用^[21].

非晶碳膜可以在很宽的一个范围内调节其光伏效应,可以通过掺杂或控制微结构在一个相对较宽的范围(0.2—3 eV)来调节带隙.一些研究组已经报道了用不同工艺技术^[22—25]制备的基于 a-C/Si 薄膜异质结的光伏效应和太阳能电池.例如, Yu 等人^[22]制备了基于 p-C/n-si 的薄膜异质结的光伏太阳能电池,在波长范围 400—800 nm, 75 mW/cm² 的近似于太阳光的照射条件下,太阳能电池的转换效率为 6.45%,填充因子可达 65%.

碳材料是一种潜在的低成本又具有较高效率的太阳能电池材料.非晶碳膜可在很宽的一个范围内调节其能带结构,并且制备工艺简单,是一种具有良好应用前景的光伏材料.科学家们通过各种方法来实现 p-n 异质结太阳能电池的表面钝化^[26,27].另外,氧化铝层一般是作为 MOS 器件的栅层来减少漏电流^[28].本文通过在非晶碳膜中引入 Fe 元素来改善其半导体性^[12,13],并在碳和硅界面处引入氧化铝层实现表面钝化,研究了基于 a-C: Fe/AlO_x/Si 基异质结的太阳能电池.

2. 试验方法

使用脉冲激光沉积技术 (pulsed laser deposition, PLD) 在电阻率为 0.55—0.8 Ω·cm 的 n-Si(100) 上依次沉积了 2 nm 的氧化铝膜和 80 nm 的

掺铁非晶碳膜.氧化铝靶是采用单晶氧化铝靶;高纯 Fe-C 复合靶(铁-碳质量比为 5:95)在 1473 K 通过热压烧结制备的.镀膜前,先将基片依次放入丙酮、酒精和去离子水中超声清洗 10 min;然后,先用 5% 的 HF 酸腐蚀 Si 基片约 5 min,再用去离子水冲洗,然后快速放入沉积室,迅速抽真空至 3×10^{-4} Pa,然后加热到 573 K,通过 248 nm 的 UV 激光器 (Lambda Physik LPX 205),能量密度为 8 J/cm²,频率为 10 Hz,先沉积氧化铝薄膜层,保温 10 min;然后沉积碳膜层,保温 10 min 后,缓慢降至室温.镀膜时基片托保持旋转以保证膜的均匀性,靶基距固定在 5 cm 左右.通过配有能谱 (Link ISIS) 的场发射透射电镜 (JEOL-2010F) 表征了异质结的界面结构;通过配有 Keithley2400 电流源表的太阳光模拟测量系统仪测量了 a-C: Fe/AlO_x/Si 异质结的太阳能电池的性能.另外, a-C: Fe 膜的吸收光谱是通过 Hitachi U-3400 双束分光光度计测量同样条件下沉积在石英基底上的非晶碳膜样品得到的.

图 1 给出了 a-C: Fe/AlO_x/Si 异质结的界面高分辨照片和 a-C: Fe/AlO_x/Si 异质结的界面高分辨照片.从图 1 中可以看出,非晶 C 膜结构十分均匀,没有明显的 C 和 Fe 的微晶或者团簇结构,这和我们以前观察到的结果是一致的;氧化铝层亦为非晶结构,厚度比较均匀;Co 层形成连续膜,厚度均匀,和 Si 基底 C 层均没有明显的扩散.这表明,采用以上镀膜参数在我们的 PLD 设备上可以制备出界面良好的 a-C: Fe/AlO_x/Si 基异质结.

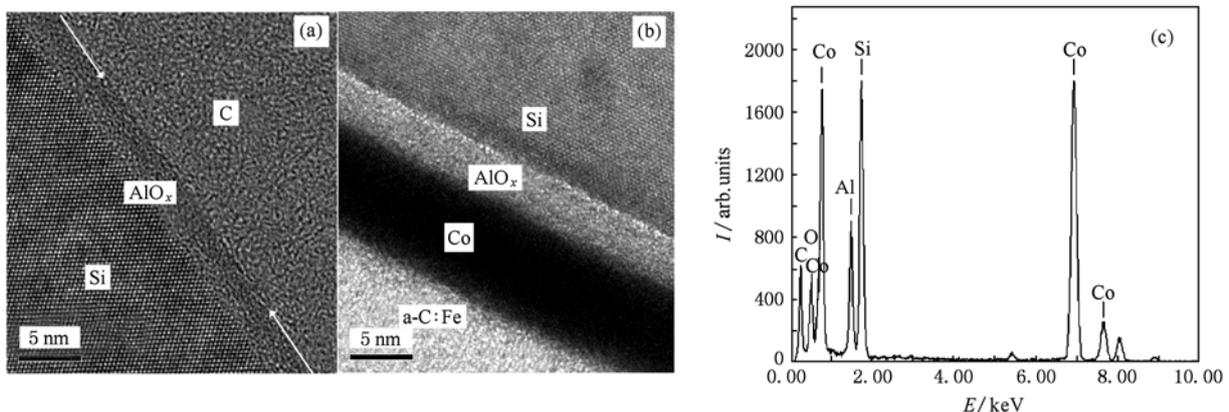


图 1 异质结界面结构分析 (a) a-C: Fe/AlO_x/Si 异质结界面高分辨照片; (b) a-C: Fe/Co/AlO_x/Si 异质结的界面高分辨照片; (c) 界面能谱分析

3. 结果与讨论

非晶碳膜 a-C: Fe 的光学性质是通过在紫外—可见—近红外 (UV-Vis-NIR) 测量光学透过率谱得到的. 图 2 给出了 a-C: Fe/石英的透过率随波长的变化关系. 可以看出, a-C: Fe 薄膜的透过率谱在近红外区表现出较高的光学透过率. 对于非晶材料, 一般用 Tauc 关系来描述吸收系数和光子能量之间

的变化关系^[29], 即

$$(\alpha h\nu)^{1/2} = B(h\nu - E_{opt}), \quad (1)$$

这里, ν 是入射光子的频率, E_{opt} 是材料的光学带隙, α 是吸收系数, h 是普朗克常量, B 是常数. 在带隙附近, $(\alpha h\nu)^{1/2}$ 随光子能量 $h\nu$ 的变化曲线是线性的, 图 2(b) 中的直线在光子能量轴的截距对应于非晶材料的带隙宽度. 由此可知 a-C: Fe 薄膜的光学带隙大约为 2.2 eV.

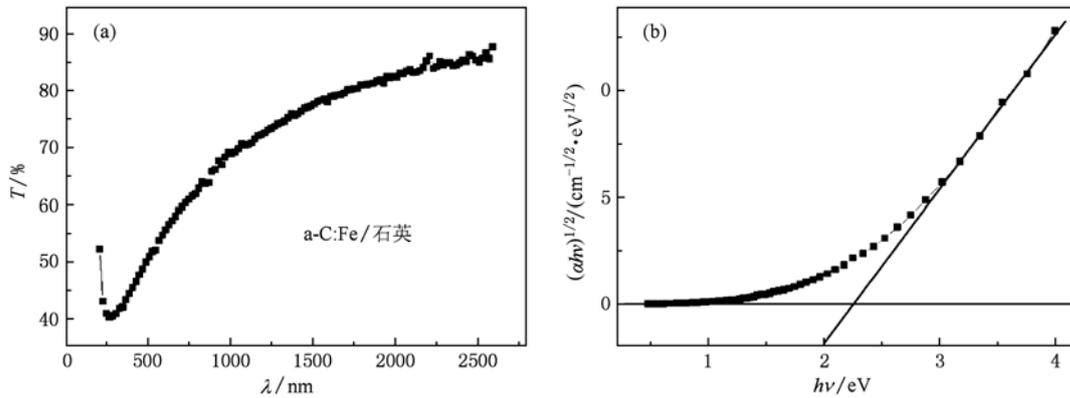


图 2 a-C: Fe 膜的光学性质 (a) 透过率与波长的关系; (b) $(\alpha h\nu)^{1/2}$ 与 $h\nu$ 的关系

图 3 给出了无光照和标准日光照条件下 a-C: Fe/ AlO_x (2.5 nm)/Si 异质结的 I - V 曲线. 可以看出, 无光照条件下, 异质结表现出良好的整流效应, 在偏压 2 V 时整流比可达 675. 当标准日光

(AM1.5, $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$) 照射时, a-C: Fe/ AlO_x (2.5 nm)/Si 异质结呈现出了明显的光伏效应, 其开路电压为 0.33 V, 短路电流为 0.27 mA (样品面积约为 6 mm^2), 可得短路电流密度为 $4.5 \text{ mA}/\text{cm}^2$.

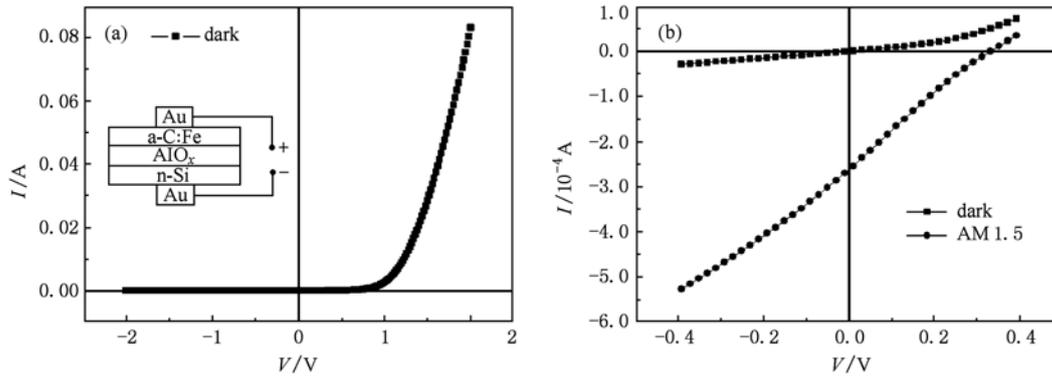


图 3 a-C: Fe/ AlO_x (2.5 nm)/Si 异质结的 I - V 曲线 (a) 无光照 (dark); (b) 无光照和标准太阳光照条件 (AM1.5) 比较

由此, 近似计算得到 a-C: Fe/ AlO_x /Si 异质结太阳能电池的填充因子为^[4]

$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} = \frac{2 \times 10^{-5}}{0.33 \times 2.7 \times 10^{-4}} = 0.22, \quad (2)$$

这里, FF 为填充因子, V_{oc} 和 I_{sc} 分别是太阳能电池

对应的开路电压和短路电流, V_{mp} 和 I_{mp} 分别对应于最大输出功率时对应的电压和电流. 由此计算得到填充因子为 22%, 并得到转换效率为 0.35%.

为了研究氧化铝层厚度的影响, 我们制备了氧化铝层厚度为 2.5 nm (AlO_x 厚度是首先通过 TEM

标定,然后根据沉积时间估计得到)的 a-C: Fe/AlO_x (2.5 nm)/Si 异质结,其在黑暗和光照条件 (AM1.5) 下的 *I-V* 曲线如图 4 所示,其开路电压为 0.33 V,短路电流为 0.21 mA (样品面积 6 mm²),通过计算得到其填充因子为 24%,并由此计算得到太阳能电池的转化效率为 0.29%. 与氧化铝层厚度为

2 nm 的样品相比,其开路电压保持不变,但短路电流从 0.27 mA 降低到 0.21 mA,说明在氧化铝较薄的情况下氧化铝层的厚度主要影响短路电流的大小,对开路电压几乎没有影响. 另外,太阳能电池的填充因子略微增加,但太阳能转化率下降 15% 左右.

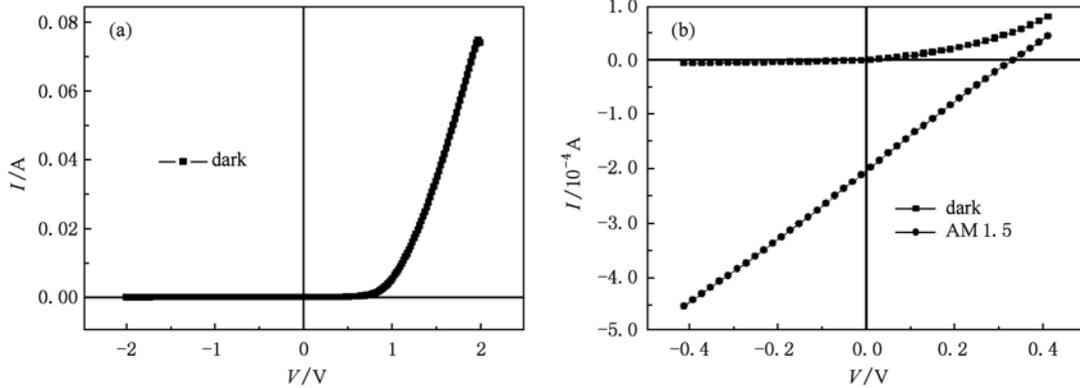


图 4 a-C: Fe/AlO_x(2.5 nm)/Si 异质结的 *I-V* 曲线 (a) 无光照; (b) 无光照和标准太阳光照条件 (AM1.5) 比较

为了进一步研究界面态对异质结 a-C: Fe/AlO_x/Si 异质结太阳能电池的影响,我们在氧化铝和 a-C: Fe 膜的界面引入 Co 薄层 (厚度为 6—7 nm),制备了 a-C: Fe/Co/AlO_x/Si 异质结. 图 5 给出了无光照和有光照 (AM1.5) 条件下 *I-V* 曲线,依然观察到了一定的光伏效应,其开路电压为 0.14 V,短路

电流为 0.14 mA (电极面积 6 mm²),填充因子接近于 25%,太阳能电池的转换效率仅为 0.09%. 可见 Co 层的引入非常明显降低了其开路电压和短路电流 (相比于无 Co 层的样品),太阳能电池的效率下降为 0.09%,说明 Co 层的引入不利于太阳能电池的提高.

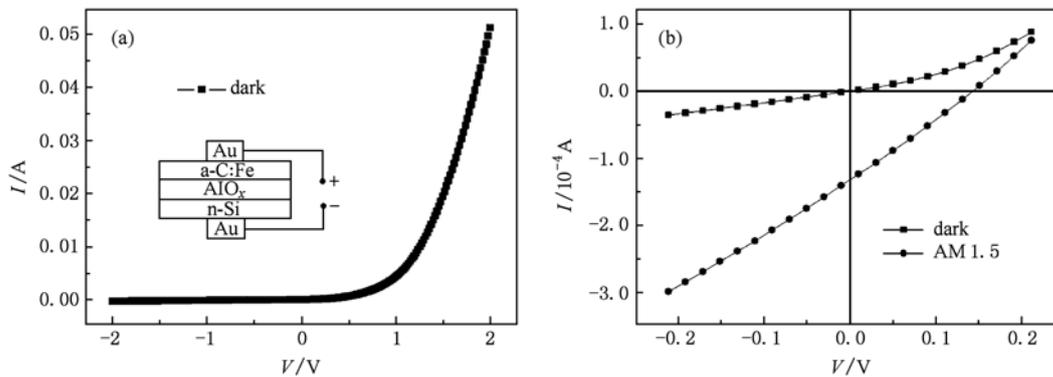


图 5 a-C: Fe/Co/AlO_x(2 nm)/Si 异质结的 *I-V* 曲线 (a) 无光照; (b) 无光照和标准太阳光照条件 (AM1.5) 比较

光照条件下, a-C: Fe/Si 异质结在正偏压和反偏压都观察到了明显光电导,但没有明显的光伏效应,说明氧化铝层的作用是非常关键的. 我们猜想氧化铝层的引入,降低了界面态的数量,并引入了势垒,使载流子以隧穿电流而不是复合电流传输,大大减少了载流子的复合概率,因此观察到了明显的光伏效应. a-C: Fe/Si 异质结中,界面存在大量的

界面态. 电输运机制主要以复合电流和扩散电流为主. 太阳光的辐射下产生的载流子在界面处复合而不能产生明显的光电流或光电压,因此没能表现出明显的光伏效应.

通过 *C-V* 可以测试出突变异质结势垒的高度,以及根据在零偏压附近的 $1/C^2-V$ 的弯曲判定界面态数量^[28]. 对于突变异质结, $1/C^2-V$ 曲线是在反偏

压区域是一条直线,并且该直线在电压轴的截距就是内建势垒高度. 异质结在反偏压下靠近零点附近区域弯曲,这表明有界面态存在^[28];界面态电荷产生的电容将使 $1/C^2-V$ 偏离直线^[30,31]. 另外,当外加正向等于界面势垒高度时, p-n 结的电容达到最大值,因此也可以通过测量正偏压下的电容来确定 p-n 结的界面势垒高度^[31].

我们尝试测量了 a-C: Fe/AlO_x(2 nm)/Si, a-C: Fe/Co/AlO_x(2nm)/Si 以及无氧化铝插层异质结的 C-V 曲线,结果如图 6 所示. 可以看出, a-C: Fe/AlO_x(2 nm)/Si 基异质结的 $1/C^2-V$ 曲线在负的大偏压

下具有很好的线性关系,表明可以把 a-C: Fe/AlO_x(2 nm)/Si 和 a-C: Fe/Co/AlO_x(2 nm)/Si 异质结作为突变异质结处理. 对于 a-C: Fe/AlO_x(2 nm)/Si 异质结,其 $1/C^2-V$ 曲线与电压轴的交点对应的电压为 1.5 V (即内建势垒高度为 1.5 V);而 a-C: Fe/Co/AlO_x(2 nm)/Si 异质结的 $1/C^2-V$ 曲线电压轴的交点对应的电压为 1.8 V (即内建势垒高度为 1.8 V). a-C: Fe/AlO_x(2 nm)/Si 异质结正偏压下电容在 1.3 V 到 1.5 V 之间最大,与反向 C-V 测量得到的结果比较接近,也从另一角度反映了我们采用的分析方法是可信的.

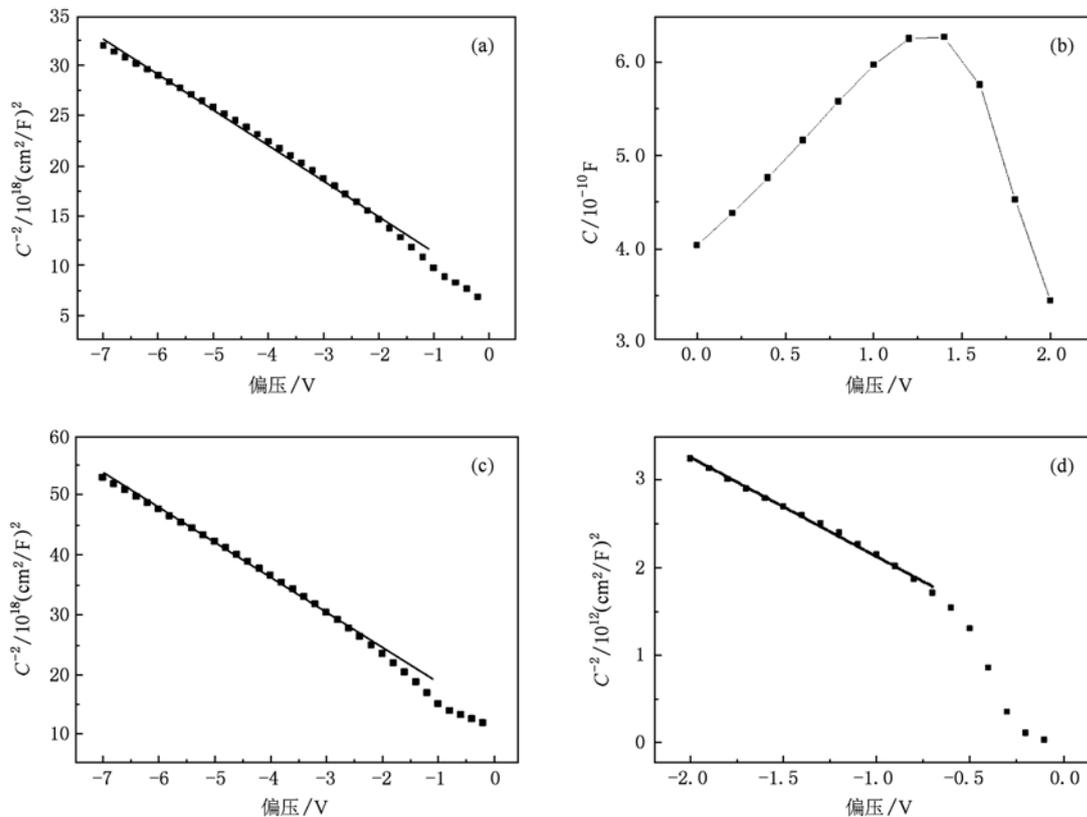


图 6 电容电压曲线 (a) a-C: Fe/AlO_x(2 nm)/Si 的反偏压下 $1/C^2-V$ 曲线; (b) 正偏压下 C-V 曲线; (c) a-C: Fe/Co/AlO_x(2 nm)/Si 异质结反偏压下 $1/C^2-V$ 曲线; (d) a-C: Fe/Si 异质结反偏压下 $1/C^2-V$ 曲线

由上可知, AlO_x 层的引入增加了界面势垒,使势垒高度从 0.87 eV 增加到 1.5 eV; Co 层的引入也增加了势垒高度. AlO_x 厚度的增加和 Co 层的引入都会进一步增加异质结的势垒,导致太阳能电池的串联电阻增大,光生载流子隧穿通过势垒的概率降低,不利于光伏电流或光伏电压的产生,从而降低了太阳能电池的转换效率. 以上样品中相对还比较低的填充因子,也能说明 a-C: Fe/AlO_x/Si 基太阳能电池存在较大的串联电阻. 另外,氧化铝层的引入

一方面阻止了碳膜中的 Fe 元素和 Si 发生化学反应,降低了界面缺陷;另一方面氧化铝/Si 界面的负电荷区可以屏蔽界面处的少数载流子,形成一定的场效应钝化作用^[32,33]. 氧化铝层钝化了异质结界面,大大减少了界面能级的数量和缺陷,降低了光生载流子的复合概率,这一点从 a-C: Fe/AlO_x(2nm)/Si 的异质结 $1/C^2-V$ 曲线在零点附近弯曲很小(相对变化值,与无氧化铝层的样品相比)也可以看出. 因此,氧化铝层的引入使非晶碳/单晶硅基异

质结表现出良好的光伏效应. 由于普通 PLD 技术生长厚度小于 2 nm 的连续膜比较困难, 我们没有制备具有更薄氧化铝绝缘薄膜的异质结太阳能电池. 通过其他方法制备基于更薄的氧化铝插层的 a-C: Fe/AlO_x/Si 异质结太阳能电池将是我们下一步研究的重点.

4. 结 论

a-C: Fe/Si 异质结界面引入氧化铝绝缘层制备了 a-C: Fe/AlO_x(2 nm)/Si 基异质结, 研究了其光

伏效应及其在太阳能电池上的应用. a-C: Fe/AlO_x(2 nm)/Si 基异质结太阳能电池在标准日光照射 (AM1.5, 100 mW/cm²) 下, 可获得 0.33 V 的开路电压和 4.5 mA/cm² 的电流密度, 太阳能电池的转换效率为 0.35%. 氧化铝层的引入降低了界面能级数目, 增加了界面势垒高度. 界面能级数目降低减少了光生载流子在界面复合的概率, 有利于光电流和光电压的产生.

此项研究使用了北京电子显微镜中心的设备和资源, 表示感谢.

- [1] Goetzberger A, Hebling C, Schock H W 2003 *Mat. Science Eng. R* **40** 1
- [2] Kelzenberg M D, Boettcher S W, Petykiewicz J A, Turner-Evans D B, Putnam M C, Warren E L, Spurgeon J M, Briggs R M, Lewis N S, Atwater H A 2010 *Nature Mater.* **9** 239
- [3] Harry A A, Albert P 2010 *Nature* **9** 205
- [4] Wenham S R, Green MA, Watt M E, Corkish R 2007 *Applied photovoltaics* (2nd ed) (London: Earthscan Publications Ltd.)
- [5] Zhu H W, Wei J Q, Wang K L, Wu D H 2009 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **93** 1461
- [6] Hao H Y, Kong G L, Zeng X B, Xu Y, Diao H W, Liao X B 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3327 (in Chinese) [郝会颖、孔光临、曾湘波、许颖、刁宏伟、廖显伯 2005 物理学报 **54** 3327]
- [7] Li Y J, Zheng J G, Feng L H, Li B, Zeng G G, Cai Y P, Zhang J Q, Li W, Lei Z, Wu L L, Cai W 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 625 (in Chinese) [李愿杰、郑家贵、冯良桓、黎兵、曾广根、蔡亚平、张静全、李卫、雷智、武莉莉、蔡伟 2010 物理学报 **59** 625]
- [8] Zhang W Y, Wu X P, Sun L J, Lin B X, Fu Z X 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4471 (in Chinese) [张伟英、邬小鹏、孙利杰、林碧霞、傅竹西 2008 物理学报 **57** 4471]
- [9] Li Z R, Saini V, Dervishi E, Xu Y, Mahmood M, Biris A R, Biris A S 2009 *Nanotech Conference Expo* **1** 53
- [10] Krishna K M, Nukaya Y, Soga T, Jimbo T, Umeno M 2001 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **65** 163
- [11] Tetsuo S, Toshihide K, Yasuhiko H, Jimbo T 2005 *Thin Solid Films* **482** 86
- [12] Hao L Z, Xue Q Z, Gao X L, Li Q, Zheng Q B, Yan K Y 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 053718
- [13] Wan C H, Zhang X Z, Zhang X, Gao X L, Tan X Y 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 022105
- [14] Freitag M, Martin Y, Misewich J A 2003 *Nano. Lett.* **3** 1067
- [15] Balasubramanian K, Fan Y W, Burghard M 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 2400
- [16] Lee J U 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 073101
- [17] Kymakis E, Amaratunga G A 2002 *J. Appl. Phys. Lett.* **80** 112
- [18] Kawano T, Christensen D, Chen S P, Cho C Y, Lin L W 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 163510
- [19] Behnam A, Johnson J L, Choi Y, Ertosun M G, Okyay A K, Kapur P, Saraswat K C, Ural A 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 243116
- [20] Wei J Q, Jia Y, Shu Q K, Gu Z Y, Wang K L, Zhuang D M, Zhang G, Wang Z C, Luo J B, Cao A Y, Wu D H 2007 *Nano. Lett.* **7** 2317
- [21] Zhou S Y, Gweon G H, Fedorov A V, First P N, De Heer W A, Lee D H, Guinea F, Neto A H C, Lanzara A 2007 *Nature Mater.* **6** 770
- [22] Yu H A, Kaneko Y, Yoshimura S, Otani S 1996 *Appl. Phys. Lett.* **68** 547
- [23] Krishna K M, Umeno M, Nukaya Y, Soga T, Jimbo T 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 1472
- [24] Rusop M, Mominuzzaman S M, Soga T, Jimbo T, Umeno M 2006 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **90** 3205
- [25] Yap S S, Tou T Y 2008 *Vacuum* **82** 1449
- [26] Taguchi M, Kawamoto K, Tsuge S, Baba T, Sakata H, Morizane M, Uchihashi K, Nakamura N, Kiyama S, Oota O 2000 *Prog. Photovolt: Res. Appl.* **8** 503
- [27] Zhao L, Zhou C L, Li H L, Diao H W, Wang W J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3212 (in Chinese) [赵雷、周春兰、李海玲、刁宏伟、王文静 2008 物理学报 **57** 3212]
- [28] Feng Q, Hao Y, Yue Y Z 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1886 (in Chinese) [冯倩、郝跃、岳远征 2008 物理学报 **57** 1886]
- [29] Ech-chamikh E, Essaifi A, Azizan M, Ijdiyaou Y 2006 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **90** 1424
- [30] Veerasamy V S, Amaratunga G A J, Park J S, Mackenzie H S, Milne W L 1995 *IEEE Trans. Electr. Dev.* **42** 577
- [31] Sugiura M, Uragou K, Noda M, Tachiki M, Kobayashi T 1999 *Jpn. J. Appl. Phys.* **38** 2675
- [32] Terlinden N M, Dingemans G, van de Sanden M C M, Kesselsa W M M 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 112101

Photovoltaic effect of a-C: Fe/ AlO_x /Si based heterostructures^{*}

Wu Li-Hua Zhang Xiao-Zhong[†] Yu Yi Wan Cai-Hua Tan Xin-Yu

(Laboratory of Advanced Materials, Department of Materials Science and Engineering,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(Received 4 May 2010; revised manuscript received 11 June 2010)

Abstract

The photovoltaic effect of a-C: Fe/ AlO_x /Si based heterostructures prepared by Pulsed Laser Deposition (PLD) and its applications for solar cells were investigated. Thin alumina layer with a thickness of $\sim 2\text{nm}$ was introduced to the interface between carbon and silicon, and the photovoltaic properties, such as open circuit voltage of $\sim 0.33\text{ V}$ and short current density of $\sim 4.5\text{ mA/cm}^2$, were improved dramatically compared with the samples without the insulation alumina layer. This may be related to the improvement of interface quality, where there are lower recombination centers such as defects and traps, which are approved by the C - V measurement. This work may shed light on the carbon/silicon based solar cells.

Keywords: photovoltaic effect, amorphous carbon, heterostructures, alumina

PACS: 78.56.-a, 78.66.Jg, 73.40.Lq

^{*} Project supported by the Key Program of Jointed Funds of National Natural Science Foundation of China-Guangdong Province (Grant No. U0734001), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50772054) and the Special Program of National Basic Research Program of China (Grant No. 2008CB617601).

[†] Corresponding author. E-mail: xzzhang@tsinghua.edu.cn