

并五苯场效应管的电学特性^{*}

邓金祥^{1,†} 陈光华² Beton P H³

(1 北京工业大学应用数理学院, 北京 100022)

(2 北京工业大学材料学院, 北京 100022)

(3 School of Physics and Astronomy, Nottingham University, UK)

摘要: 介绍了用高真空中热蒸发镀膜的方法制备并五苯薄膜场效应晶体管. 作为场效应管半导体层的并五苯薄膜沉积在 p 型 Si(100) (14.0~20.0 Ω·cm) 衬底上. 场效应管中并五苯薄膜厚度为 70nm, 源极、漏极和栅极 (Au) 的厚度均为 50nm, 绝缘层 SiO₂ 的厚度为 300nm, 沟道宽度为 190μm, 沟道长度为 15μm. 用 AFM 表征了并五苯薄膜表面形貌, 并研究了薄膜生长速率对并五苯场效应晶体管电学特性的影响. 在薄膜生长速率为 0.24 和 1.36nm/min 时, 场效应管的载流子迁移率分别为 2.7×10^{-4} 和 $2.2 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$.

关键词: 有机薄膜场效应管; 并五苯; 电学特性

PACC: 7280L; 7360

中图分类号: TN304.5

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)S0-0214-04

1 引言

以硅为代表的无机半导体电子元器件的尺寸已小至亚微米量级, 其芯片技术所能达到的集成度已趋向于物理极限. 而有机电子元器件在一些领域中拥有超越无机元器件的优异特性^[1].

有机半导体材料与传统的半导体材料相比有一定的相似性, 它们在电导率、载流子迁移率和能隙等方面存在着较多的类似点, 它们的应用领域也有一定的相似性. 但是有机半导体材料又具有许多不同于无机半导体材料的新特点. 与无机半导体材料相比, 有机半导体材料除了其器件制作方法简单和制作成本低外, 有机化合物的丰富多彩也为材料的设计和选择提供了广阔的天地. 人们有理由相信, 在不远的将来, 有机半导体材料及器件将在人类生活中占有一席之地^[2].

有机电子器件的开发研究已有数十年的历史, 例如利用有机材料与金属的肖特基接触效应的太阳能电池, 使用各种有机发光材料的电致发光器件的研制及其机理解析, 以及金属-氧化膜-有机半导体结构的场效应三极管等有很多研究成果发表^[1].

场效应晶体管是现代电子学中应用最广泛的器件之一, 是电压控制器件, 即利用改变电压(电场)来控制固体材料导电能力的有源器件. 无机材料场效应晶体管存在制造成本高、单晶难于制备、需要高温

工艺等问题. 利用有机材料充当绝缘层、半导体层等功能层制备的有机薄膜场效应晶体管 (organic thin-film field-effect, OTFT), 将在液晶显示器 (LCD) 和有机发光二极管 (OLED) 的驱动显示中得到应用. 由于制备工艺简单、成本低等优势, 有机薄膜场效应管的研究越来越受到人们的重视^[3].

有机场效应管的应用需要解决的突出问题是提高其场效应迁移率和增大器件的开关电流比. 有机场效应管材料的选取和制备是目前大家关注的问题. 现在看好的材料是噻吩类和并苯类等齐聚物. 并五苯是由五个苯环组成的芳香分子, 是最有希望的有机半导体材料之一, 它的迁移率和开关电流适合制造薄膜晶体管器件^[4]. 关于沉积温度和不同绝缘层对并五苯场效应管的影响, 人们已经进行了研究, 沉积速率的影响的研究则尚未开展. 本文介绍用高真空中热蒸发镀膜的方法制备并五苯薄膜场效应晶体管, 用 AFM 表征其表面形貌, 研究了薄膜生长速率对并五苯场效应晶体管电学特性的影响.

2 实验

首先用真空蒸发方法在含有硅氧化层的硅衬底上蒸镀金作为场效应管的源极、漏极和栅极, 然后将硅衬底置入有机薄膜蒸发真空系统中蒸镀并五苯薄膜.

硅衬底为(100)取向 p 型, 其电阻率为 14.0~

^{*} 北京市委组织部优秀人才培养基金资助项目(批准号:20051D0501521)

[†] 通信作者. Email: jdeng@bjut.edu.cn

2005-12-08 收到

20.0Ω·cm. 并五苯蒸发源为并五苯颗粒, 从 Aldrich 公司购得. 在并五苯颗粒加热前, 将系统的背景真空抽至 1.33×10^{-6} Pa, 在并五苯蒸发源加热约 3h 后, 其蒸发速率才能稳定, 然后, 移开硅衬底上方的挡板, 开始在硅衬底上沉积并五苯薄膜, 在薄膜的沉积过程中衬底温度保持在室温. 在沉积不同的样品时, 蒸发源的加热器加不同的电流, 这样可达到控制蒸发速率的目的. 在蒸发系统中装有石英晶体振荡薄膜厚度监测仪, 可以精确测定并五苯薄膜的厚度.

并五苯场效应管的结构如图 1 所示, 由上至下为并五苯(Pentacene)薄膜, 源极和漏极(Au), 绝缘层(SiO₂), 栅极(Au). 其中, 并五苯薄膜厚度为 70nm, 源极、漏极和栅极的厚度均为 50nm, 绝缘层 SiO₂ 的厚度为 300nm.

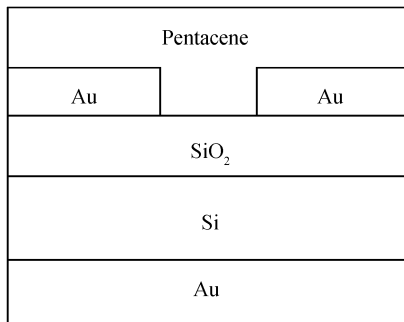


图 1 并五苯场效应管结构示意图

Fig.1 Structure of pentacene thin film transistor

并五苯场效应管的电压电流特性由三极管电学特性测试系统测得, 并五苯薄膜的形貌由 AFM 图给出.

3 结果与讨论

图 2 给出以不同的薄膜生长速率沉积得到的四个并五苯场效应管中并五苯薄膜的 AFM 图.

从图 2 可以看出, 薄膜中并五苯颗粒的尺寸从几十到几百纳米不等, 其平均尺寸随着生长速率的增加而减小, 因此生长速率越大, 颗粒越不易长大, 这和生长无机薄膜的一般情况是相同的. 仔细观察 AFM 图可以发现, 薄膜中的并五苯颗粒具有层状结构, 这和已有文献报道^[5]的结果一样. 从并五苯表面的形貌, 根据经验可以判断, 这里的并五苯薄膜具有多晶结构^[5,6].

图 3 给出并五苯场效应管在不同的栅极电压下漏极电流随漏极电压变化的特性曲线. 这是一个典型的 p 型半导体场效应管的漏极电流随漏极电压变化的曲线. 对于一定的栅极电压, 在漏极电压较小时, 漏极电流随漏极电压的变化是线性的; 当漏极电

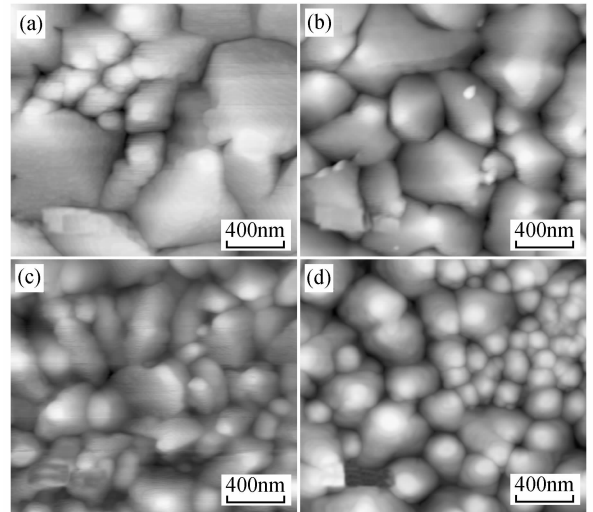


图 2 在不同生长速率下沉积的并五苯薄膜的 AFM 图 (a) 0.24nm/min; (b) 0.77nm/min; (c) 0.92nm/min; (d) 1.36nm/min

Fig.2 AFM images of pentacene thin films for different deposition rates (a) 0.24nm/min; (b) 0.77nm/min; (c) 0.92nm/min; (d) 1.36nm/min

压增加到一定程度, 漏极电压的增加不再引起漏极电流的变化, 漏极电流趋于饱和. 从图中可以看出, 栅极电压由负变正逐渐增大时, 漏极电流随之增大, 这是因为并五苯 p 型半导体, 其中空穴为多数载流子, 在栅极电压为正时, 空穴运动至漏极和源极之间, 使得源极和漏极之间的空穴增加, 从而漏极电流增大. 当栅极电压为很高的负电压时, 如为 -90 或 -60V 时, 漏极电流几乎为零, 此时, 空穴运动至栅极附近, 在源极和漏极之间形成耗尽层.

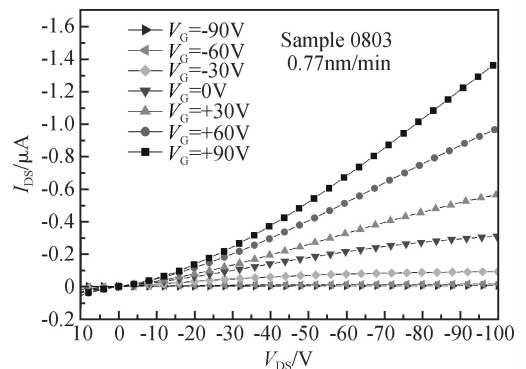


图 3 并五苯场效应管的电流电压特性

Fig.3 Drain current-voltage characteristics of pentacene thin film transistor

根据饱和区的电流随栅极电压的变化情况, 可以求出场效应管的载流子迁移率, 所用的公式为^[6]

$$I_{DS} = \frac{WC_i}{2L} \mu (V_G - V_T)^2$$

式中 W 和 L 分别代表场效应管的通道宽度和通道长度; V_G 代表栅极电压; V_T 代表阈值电压; C_i 代表绝缘介质层单位面积的电容, μ 代表场效应管的载流子迁移率. 这里, 并五苯场效应管的沟道宽度 $W = 190 \mu\text{m}$, 沟道长度 $L = 15 \mu\text{m}$. 不同生长速率下制得的场效应管的饱和电流值和载流子的迁移率如图 4 所示.

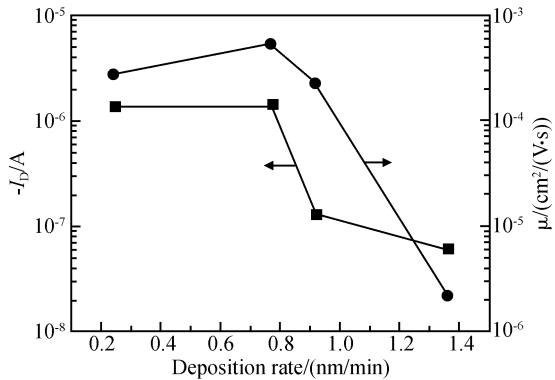


图 4 场效应管的漏极饱和电流及载流子迁移率随生长速率的变化

Fig. 4 Saturation current and mobility of pentacene thin film transistor for different deposition rates

从图 4 可以看出, 在并五苯薄膜生长速率由 0.24 增为 0.77 nm/min 时, 场效应管的漏极饱和电流和载流子迁移率略有增加, 这可能是因为生长同样厚度的薄膜, 生长速率为 0.24 nm/min 的情况比生长速率为 0.77 nm/min 的情况需要更长的时间, 从而导致薄膜中有较多的气体杂质, 使得其导电能力降低. 在生长速率增加到 0.77 nm/min 之后, 若生长速率再增加, 则场效应管的漏极饱和电流和载流子迁移率随之下降, 这是因为生长速率增加使得薄膜中的并五苯颗粒减小, 薄膜中有更多的晶粒间界, 从而导致漏极饱和电流以及载流子的迁移率降低. 这里得到的并五苯场效应管的载流子迁移率最大为 $5.2 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, 比文献 [7] 报道的 $0.01 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 和文献 [8] 报道的 $0.16 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 都小. 我们认为, 这是由于生长条件的不同造成的, 其中一个重要的不同就是这些文献制备并五苯晶体管都给衬底加以几十度到一百几十度的温度, 而本文制备并五苯晶体管是在室温下完成的. 较高的温度有利于并五苯薄膜中大的晶粒的形成, 从而使并五苯场效应管的载流子迁移率增高.

4 结论

以 Si 为衬底, SiO_2 为绝缘层, 并五苯薄膜为半导体层, 制备了 p 型有机薄膜场效应管. AFM 形貌图表明该薄膜场效应管中的并五苯薄膜为多晶薄膜, 并五苯薄膜中颗粒平均尺寸随着薄膜生长速率的增加而减小. 研究表明, 并五苯薄膜的生长速率对其场效应管有显著影响, 一般说来, 并五苯薄膜场效应管的迁移率随薄膜生长速率的减小而增大. 在薄膜生长速率为 0.24 和 1.36 nm/min 时, 场效应管的载流子迁移率分别为 2.7×10^{-4} 和 $2.2 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$.

参考文献

- [1] Wang Dongxing, Zhu Min, Kudo Kazuhiro, et al. Fabrication of organic semiconductor thin film transistor. Chinese Journal of Semiconductors, 2002, 23(6): 645 (in Chinese) [王东兴, 朱敏, 工藤一浩, 等. 有机半导体薄膜三极管的研制. 半导体学报, 2002, 23(6): 645]
- [2] Qiu Yong, Duan Lian. Organic electroluminescence display technology and organic semiconductors. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(Supplement): 209 (in Chinese) [邱勇, 段炼. 有机发光显示技术及有机半导体. 半导体学报, 2003, 24(增刊): 209]
- [3] Qiu Yong, Hu Yuanchuan, Dong Guifang, et al. Fabrication of organic semiconductor thin film transistor. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(8): 580 (in Chinese) [邱勇, 胡远川, 董桂芳, 等. 有机薄膜场效应晶体管的研制. 科学通报, 2002, 47(8): 580]
- [4] Zhang Sumei, Shi Jiawei, Liu Jianjun, et al. Physical vapor growth of pentacene crystal thin films. Semiconductor Optoelectronics, 2002, 23(6): 418 (in Chinese) [张素梅, 石家纬, 刘建军, 等. 物理汽相生长并五苯晶体薄膜. 半导体光电, 2002, 23(6): 418]
- [5] Wang Guanzhong, Luo Yi, Beton P H. High mobility organic transistors fabricated from single pentacene microcrystals grown on a polymer film. Appl Phys Lett, 2003, 83(15): 3108
- [6] Lim S C, Kim S H, Lee J H, et al. Organic thin-film transistors on plastic substrates. Materials Science and Engineering B, 2005, 121: 211
- [7] Puigdollers J, Voz C, Martin I, et al. Electrical characterization of pentacene thin-film transistors with polymeric gate dielectric. Synthetic Metals, 2004, 146: 355
- [8] Park J H, Kang C H, Kim Y J, et al. Characteristics of pentacene-based thin-film transistors. Materials Science and Engineering C, 2004, 24: 27

Electric Characteristics of Pentacene Field Effect Transistor*

Deng Jinxiang^{1,†}, Chen Guanghua², and Beton P H³

(1 School of Applied Mathematics and Physics, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

(2 School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

(3 School of Physics and Astronomy, Nottingham University, UK)

Abstract: Organic thin film field effect transistor of pentacene is fabricated through evaporating heated pentacene powder in high vacuum. Being a semiconductor layer, pentacene thin film is deposited on p-type silicon (100) that has a silicon dioxide layer. The thickness of pentacene thin film is 70nm. The thickness of Au electrodes including source, drain and gate is 50nm. As an insulating layer, the silicon dioxide is 300nm thick. The channel in the pentacene film field effect transistor is 15 μ m long, and 190 μ m wide. AFM is used to characterize the surface morphology of the pentacene thin film. The influence of deposition rate of the pentacene film on the electric characteristics of pentacene field effect transistor is studied. At a deposition rate of 0.24 and 1.36nm/min, the mobility of the field effect transistor is 2.7×10^{-4} and $2.2 \times 10^{-6} \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ respectively.

Key words: organic thin film field effect transistor; pentacene; electric characteristics

PACC: 7280L; 7360

Article ID: 0253-4177(2006)S0-0214-04

* Project supported by the Excellent Person Training Foundation of Beijing Municipal Government (No.20051D0501521)

† Corresponding author. Email: jdeng@bjut.edu.cn

Received 8 December 2005