

固体 C_{60}/n -GaN 接触的电学性质*

陈开茅 孙文红 秦国刚 吴 克 李传义

(北京大学物理系 北京 100871)

章其麟

(电子工业部第十三研究所 石家庄 050051)

周锡煌 顾镇南

(北京大学化学系 北京 100871)

摘要 本文通过在 GaN 衬底上生长固体 C_{60} 膜制成了 C_{60}/n -GaN 接触, 并对其电学性质作了测量。我们发现该接触是理想因子接近于 1 的强整流接触异质结。在偏压为 $\pm 1V$ 时, 其整流比高达 10^6 。在固定正向偏压条件下, 异质结电流是温度倒数的指数函数, 通过求激活能得出异质结的有效势垒高度为 0.535eV。本文还发现, 固体 C_{60}/n -GaN 样品中 C_{60} 的电导随着正向偏压的增加而迅速变大。这种现象被认为起因于 n -GaN 对 C_{60} 的电子注入。

PACC: 7340L, 7360, 7220

1 引言

GaN 是一种在制作蓝光晶体管以及制作高频、大功率和高温工作器件等方面很有发展潜力的半导体材料, 由于它具有这些方面的优点, 从 90 年代初起其相关的领域一直是一热点。固体 C_{60} 和 C_{70} 等是新型的分子半导体。这些新型半导体在结构上是与 GaN 以及其它传统的半导体(如 Ge、Si、GaAs 和 InP 等)十分不同的。与 $C_{60}/$ 和 $C_{70}/$ GaN (Ge、Si、GaAs 和 InP) 接触有关的问题, 诸如两种不同物质在界面附近的相互作用、界面的电子态以及接触的光学和电学性质等具有重要的理论意义和潜在的应用价值。多种研究已证实固体 C_{60} 或 C_{70} 与若干种半导体形成(例如 Si 和 GaAs)的界面接触存在着强烈的相互作用。扫描隧道显微镜 (STM) 和扫描隧道谱 (STS) 的测量表明, C_{60} 分子和 Si 衬底形成强键, 同时有电荷从 Si 衬底转移到 C_{60} ^[1]。在先前的固体 C_{60}/Si 或 C_{70}/Si 接触的研究中, 我们发现 C_{60}/n -Si、 C_{60}/p -Si 以及 C_{70}/n -Si、 C_{70}/p -Si 均是强整流结。在偏压 $\pm 2V$ 时, 它们的整流比大于 10^4 倍^[2~6]。并且

* 国家自然科学基金资助项目, 项目号 19774003 和 59772027

孙文红 男, 1966 年出生, 在读博士生, 主要从事 GaN 系列材料的物理性质及其异质结特性的研究工作
吴 克 女, 1948 年出生, 高级工程师, 主要从事超高真空设备管理及薄膜制备工作
1998-09-21 收到本文

发现在 $C_{60}/Si(111)$ 界面上不存在高密度的电子态^[7]。我们新近的 $C_{60}/GaAs$ 研究发现 $C_{60}/n-GaAs$ 和 $C_{60}/p-GaAs$ 是更好的异质结。在偏压 $\pm IV$ 时, 它们的整流比大于 $10^{6[8-10]}$ 。但是关于 C_{60}/GaN 接触研究尚未见报道。

本文报道固体 $C_{60}/n-GaN$ 异质结的重要电学性质。实验指出该结构是很好的异质结, 当偏压为 $\pm IV$ 时, 其整流比大于 10^6 。在固体 $C_{60}/n-GaN$ 结构中, C_{60} 层的电导强烈地依赖于异质结的正向偏压, 文中对这一现象进行了讨论。

2 实验和结果

2.1 样品制备

用于这一工作的样品的衬底为 (0001) 晶向, 电阻率 $1.45\Omega \cdot cm$, 电子迁移率 $250cm^2/(V \cdot s)$ 的非掺杂 n 型 GaN 外延片, 在 GaN 片的四个角蒸上 Au/Al 电极后, 将其送入高真空室等待淀积 C_{60} 。在 BALZERS UM S-500 UHV 系统中, 将纯度为 99.9% 的 C_{60} 粉末升华淀积在 GaN 衬底上。在淀积过程中, 衬底的温度保持 $200^\circ C$ 。淀积前真空室的压力为 $1.3 \times 10^{-7} Pa$ 。 C_{60} 膜的生长速率为 $1nm/min$, 膜的厚度用一石英振荡器作适时监测, 膜的最终厚度为 $200nm$ 。X 射线测量表明这种膜为面心立方的多晶结构。最后将面积为 $3.42 \times 10^{-3} cm^2$ 的钛 (Ti) 电极蒸发在 C_{60} 膜上, 蒸发时, 衬底温度为 $100^\circ C$ 。

2.2 固体 $C_{60}/n-GaN$ 电流-电压和电流-温度特性

电流-电压 ($J-V$) 和电流-温度倒数 ($J-1/T$) 关系是用 HP34401A 型万用表研究的。将一个 $1k\Omega$ 电阻与 $C_{60}/n-GaN$ 样品串接, 量度这个 $1k\Omega$ 电阻上的电压降便可求出流过样品的电流。用一附在样品底座上的热偶监测样品的温度, 样品温度是由一精密温度控制仪控制的。当在 Ti 电极相对于 GaN 加正向电压时, $C_{60}/n-GaN$ 处于导通状态, 即电流很大; 而当加负电压时, $C_{60}/n-GaN$ 处于截止状态, 通过的电流很小。图 1 示出 $C_{60}/n-GaN$ 在 $300K$ 时的一典型 $J-V$ 曲线 (电流的对数对偏压)。

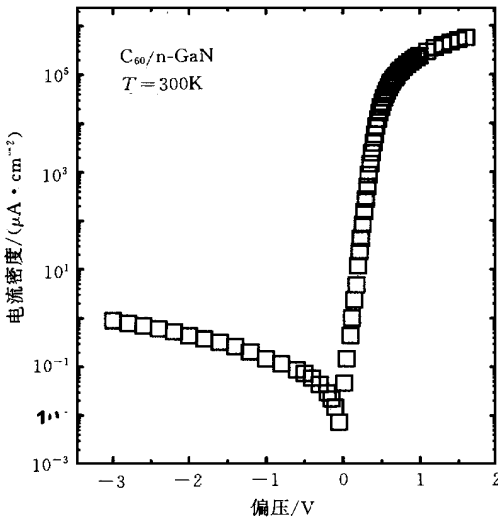


图 1 固体 $C_{60}/n-GaN$ 电流-电压特性曲线
 $T = 300K$

由图可见 $C_{60}/n-GaN$ 是一种强整流结, 当偏压 $\pm IV$ 时, 其整流比大于 10^6 。另外, 在较小正向偏压时, $\lg J$ 与正向偏压 V 成线性关系; 而在较大正向偏压时, 曲线偏向电压轴。这种现象是由样品的内部串联电阻 R_s 产生电压降引起的。我们可以应用如下公式分析 $C_{60}/n-GaN$ 的正向 $J-V$ 数据,

$$J = J_0 \{ \exp [q(V - A_s J R_s) / nkT] - 1 \} \tag{1}$$

其中 J 是电流密度; V 是样品的电压降; A_s 是 Ti 电极的面积; q 是电子电荷; n 是理想因子; k 是玻尔兹曼常数; T 是绝对温度。在满足 $q(V - A_s J R_s) \gg 3nkT$ 的条件下, (1) 式的第一级微商可表示为

$$dV/dJ = A_s R_s + nkT/qJ \tag{2}$$

如果式中样品的 R_s 是常量, 则在样品的正向电压区间内, dV/dJ 与 $1/J$ 呈线性关系, 但实际情况是 R_s 不一定是常量, 故我们在较小的电压间隔 ΔV (比如 0.1V) 内做 dV/dJ 的多点测量(比如 5 个点), 然后用最小二乘法按(2)式对测量结果进行拟合并求出相应电压间隔内的 R_s (电压为 $V + 1/2\Delta V$ 时的串联电阻). 图 2 示出 C₆₀/n-GaN 二极管串联电阻 R_s 以及理想因子 n 与结的正向压降 ($V_F = V - A_s J R_s$) 的关系. 由图可见, 在 V_F 较小时, R_s 的值高达 $1.3 \times 10^4 \Omega$, 随着 V_F 的增加, R_s 迅速减小并趋于一个不变的阻值 ($5.5 \times 10^2 \Omega$). 同样可见理想因子 n 由接近 1 变得越来越偏离于 1. 应该指出, 这种大的串联电阻主要是由非掺杂的固体 C₆₀ 引起的

为了进一步考察固体 C₆₀/n-GaN 接触势垒的性质及相关的电流运输机制, 我们在固定正向偏压的情况下, 测量了 C₆₀/n-GaN 接触电流与温度的关系. 图 3 示出正向偏压 0.30V ($0.30V \gg A_s J R_s$) 时, C₆₀/n-GaN 电流的对数随温度倒数变化的典型曲线

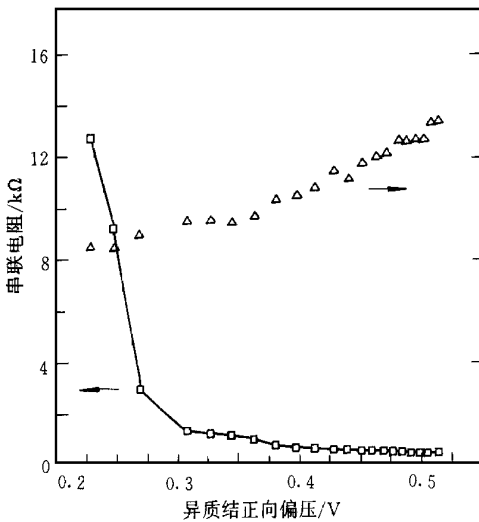


图 2 固体 C₆₀/n-GaN 异质结串联电阻及理想因子与有效正向电压的关系

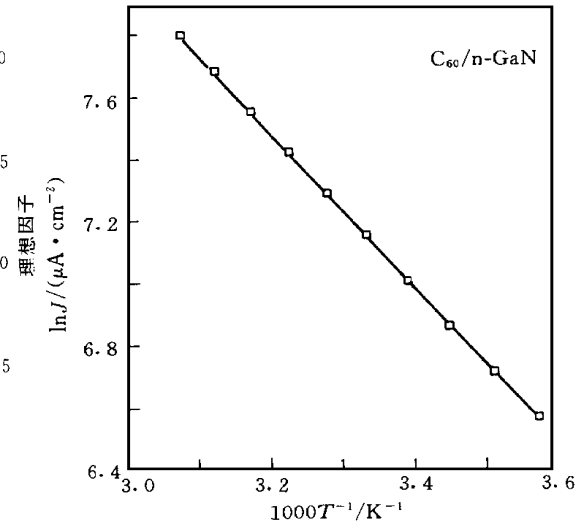


图 3 固体 C₆₀/n-GaN 异质结电流-温度关系 正向偏压为 0.30V.

由图可见, 在固定的正向偏压下, C₆₀/n-GaN 电流对数随温度倒数的增加而线性递减. 经最小二乘法对图中数据进行拟合以后, 我们发现(1)式中的 J_0 是温度倒数的指数函数, 即

$$J_0 = J_{00} \exp(-q\Phi_{\text{eff}}/kT)$$

其中 $J_{00} = 41.5 \text{ A/cm}^2$; $q\Phi_{\text{eff}} = 0.535 \text{ eV}$; $q\Phi_{\text{eff}}$ 表示固体 C₆₀/n-GaN 异质结在零偏置下的有效势垒高度. 在一般情况下, 它与固体 C₆₀ 和 GaN 的费米能级以及 C₆₀/GaN 界面电子态等都有关系

3 讨论

为了深入讨论第二节中的实验结果, 我们引进了固体 C₆₀/n-GaN 的能带模型, 见图 4. 图 4 中符号的下标“1”和“2”分别表示 C₆₀ 和 GaN, E_c 、 E_v 、 E_F 分别表示能带的导带底、价带顶及费米能级, ΔE_c 和 ΔE_v 分别表示固体 C₆₀ 和 GaN 导带底的差以及价带顶的差, qV_{b1} 和 qV_{b2} 分别表示固体 C₆₀ 和 GaN 的表面势垒. 此图为未计及界面电子态影响的 C₆₀ 和 GaN 的

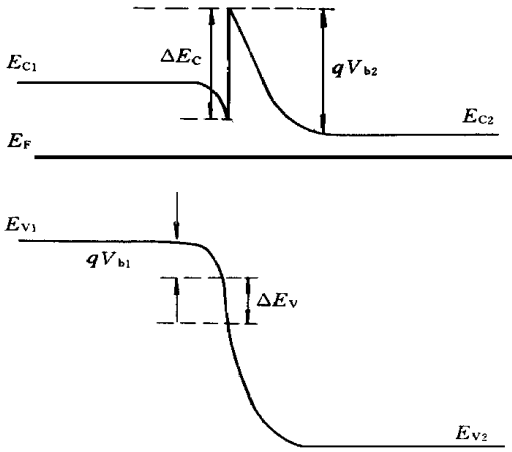


图 4 固体 $C_{60}/n\text{-GaN}$ 能带草图

从图 2 可以看到随着 $C_{60}/n\text{-GaN}$ 异质结正向偏压的增加, 串联电阻 R_s 迅速减小并趋于一个较小的常量(包含 C_{60} 和 GaN 的体电阻及其它). 这表明随着正向偏压的增加, 从 GaN 一侧注入到 C_{60} 一侧的自由电子迅速增加, C_{60} 导带中的电子也跟着增加, 从而导致 C_{60} 的电导迅速增大

4 结论

我们在这一工作中发现, 固体 $C_{60}/n\text{-GaN}$ 是一种很好的异质结, 其理想因子接近于 1, 在偏压为 $\pm 1\text{V}$ 时, 其整流比高达 10^6 . 同时我们还发现固体 C_{60} 膜的纵向电导强烈依赖于 $C_{60}/n\text{-GaN}$ 的有效正向偏压, 并对其进行了合理的解释

致谢 乔永平和张伯蕊等同志协助我们制作了实验样品 我们对此表示衷心感谢

参 考 文 献

- [1] X. D. Wang, T. Hashizume, H. Shinohara *et al* , Phys Rev. B, 1993, **47**: 15923~ 15930
- [2] 陈开茅, 金泗轩, 贾永强, 等, 半导体学报, 1994, **15**: 716~ 720
- [3] K. M. Chen, Y. Q. Jia, S. X. Jin *et al* , J. Phys : Condens Matter, 1994, **7**: L367~ L372
- [4] K. M. Chen, Y. Q. Jia, S. X. Jin *et al* J. Phys : Condens Matter, 1995, **7**: L201~ L207.
- [5] 陈开茅, 贾永强, 吴克, 等, 半导体学报, 1995, **16**: 801~ 804
- [6] K. M. Chen, K. Wu, Y. Chen *et al* , Appl Phys Lett , 1995, **67**: 1683~ 1685
- [7] Y. X. Zhang, K. M. Chen, G. G. Qin *et al* , J. Phys : Condens Matter, 1996, **8**: L201~ L207.
- [8] 陈开茅, 张亚雄, 秦国刚, 等, 半导体学报, 1997, **18**: 70~ 75
- [9] K. M. Chen, Y. X. Zhang, G. G. Qin *et al* , Appl Phys Lett , 1996, **69**: 3557~ 3559
- [10] K. M. Chen, Y. X. Zhang, S. X. Jin *et al* , 1998 Spring Meeting Proceedings D (to be published).

Electrical Properties of the Contact of Solid C₆₀ and n-GaN

Chen Kai mao, Sun Wen hong, Qin Guo gang, Wu Ke, Li Chuanyi

(Department of Physics, Peking University, Beijing 100871)

Zhang Qilin

(The 13th Institute of Ministry of Electronic Industry, Shijiazhuang 050051)

Zhou Xihuang, Gu Zhennan

(Department of Chemistry, Peking University, Beijing 100871)

Received 21 September 1998

Abstract C₆₀/n-GaN contacts have been fabricated by depositing solid C₆₀ on n-GaN films, and their electrical properties were measured. We find that the contact is a strongly rectifying heterojunction with a rectification ratio greater than 10⁶, and its ideal factor is close to 1. Current-temperature measurement shows an exponential dependence of current on reciprocal temperature, from which the effective barrier height is determined to be 0.535 eV. The series resistance measured decreases with the increase of the forward voltage and finally tends to be a constant value.

PACC: 7340L, 7360, 7220