

AlGa_N/Ga_N 异质结构中二维电子气的高温输运性质*

陶春^{1,†} 陶亚奇¹ 陈 诚^{1,3} 孔月婵¹ 陈敦军¹ 沈 波²
焦 刚³ 陈堂胜³ 张 荣¹ 郑有

(1 南京大学物理系, 江苏省光电信息功能材料重点实验室, 南京 210093)

(2 北京大学物理学院人工微结构与介观物理国家重点实验室, 北京 100871)

(3 南京电子器件研究所, 南京 210016)

摘要: 采用高温 Hall 测量仪对一个全应变和一个部分应变弛豫的 AlGa_N/Ga_N 异质结构中 2DEG 的高温输运特性进行了研究, 温度变化范围从室温到 680 K. 研究表明: 在高温段 2DEG 的迁移率主要受 LO 声子散射限制; 在室温, 异质界面处的非均匀压电极化场对 2DEG 迁移率的散射也是一个主要的散射机制. 同时, 计算结果显示, 随着温度升高, 更多的电子跃迁到更高的子带, 在更高的子带, 其波函数逐渐扩展到 AlGa_N 层内部以及 Ga_N 体内更深的位置, 导致 LO 声子散射的屏蔽效应减弱且来自 AlGa_N 层内的合金无序散射增强.

关键词: AlGa_N/Ga_N 异质结构; 二维电子气; 高温输运

EEACC: 2530B; 2520D

中图分类号: TN304.2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)07-1251-04

1 引言

AlGa_N/Ga_N 异质结构是制备高温、高频、大功率电子器件优选的材料体系, 它们在卫星、雷达和通信等领域具有很大的应用潜力. 因此, 近几年来, 基于 AlGa_N/Ga_N 异质结构的高电子迁移率晶体管 (HEMT) 的研究得到了飞速发展^[1~7]. 其中, 可承受高工作温度是 AlGa_N/Ga_N 优于 AlGaAs/GaAs 体系的一个突出优点, 但由于蓝宝石衬底材料热导率较差, 使得器件的自热效应非常严重, 会导致高的沟道温度, 从而降低了器件的可靠性. 因此, 器件能否在高温下正常工作是 AlGa_N/Ga_N 异质结构大功率器件实用化过程中不可避免的问题. 目前, 已有不少研究者对 AlGa_N/Ga_N HEMT 在高温应力下的直流和 RF 特性进行了详细研究^[4~8], 但就影响 AlGa_N/Ga_N HEMT 性能的一个最重要的物理因素——二维电子气 (2DEG) 在高温下的输运性质却少有报道. 了解 2DEG 的高温输运性质将对 HEMT 的高温衰退行为的物理机制有更深入的理解, 以便采取更有效的措施来提高 HEMT 的高温性能.

本文采用高温 Hall 测量仪对 AlGa_N/Ga_N 异质结构中 2DEG 的高温输运特性进行了研究, 温度变化范围从室温到 680 K. 同时, 通过自治地解薛定谔和泊松方程计算了 AlGa_N/Ga_N 异质结构中 2DEG 的分布和子带占据随温度的变化.

2 实验

Al_{0.2}Ga_{0.8}N/Ga_N 异质结构样品是采用金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 技术, 在 (0001) 蓝宝石衬底上外延得到. 首先, 488 °C 下在蓝宝石衬底上生长一层 Ga_N 缓冲层; 然后在 1070 °C 下生长一层厚度为 2 μm 的非故意掺杂的 Ga_N 层; 最后, 在 1080 °C 下生长一层掺 Si 的 Al_{0.22}Ga_{0.78}N 势垒层, 其厚度分别为 25 和 100 nm, 即分别为一个全应变 (试样 1) 和一个部分应变弛豫 (试样 2) 样品^[9]. 用于 Hall 测试的电极采用 Ti (20 nm)/Al (175 nm)/Ni (55 nm)/Au (45 nm) 欧姆接触, 欧姆接触的退火温度为 850 °C, 时间为 20 s. 样品的 2DEG 迁移率和浓度通过范德堡 Hall 测量得到, 测试温度从室温到 680 K.

* 国家重点基础研究专项基金 (批准号: G20000683), 国家自然科学基金 (批准号: 60406002, 60325413, 60136020), 江苏省自然科学基金 (批准号: B K2003411) 和国家高技术研究发展计划 (批准号: 2002AA305304) 资助项目

† 通信作者. Email: woyan82@eyou.com

2005-09-02 收到, 2005-11-24 定稿

3 结果与讨论

图 1 显示了试样 1 和试样 2 中 2DEG 的迁移率和浓度随温度的变化关系. 试样 1 和试样 2 在室温下的迁移率分别为 995 和 476 cm²/Vs. 当温度从室温开始增加时, 2DEG 的迁移率迅速减小, 但随着温度的进一步增加, 2DEG 的迁移率减小的速度变慢; 同时, 从图 1 也能看到, 试样 1 (全应变) 中 2DEG 的迁移率对温度的依赖比试样 2 (部分应变弛豫) 更强烈, 并且在高温段, 两条曲线彼此逐渐靠近. 这些变化趋势强烈地暗示了在高温阶段 2DEG 的迁移率是主要受 LO 声子散射限制, 这个实验结果与 Albrecht 等人^[10]的理论预测是完全一致的. 比较试样 1 和试样 2, 在室温下部分应变弛豫样品的 2DEG 迁移率明显小于完全应变样品的迁移率, 这说明由于应变弛豫在异质界面处引入的非均匀压电极化场对 2DEG 迁移率的散射是室温下的一个主要散射机制. 但随着温度的升高, LO 声子散射的作用越来越强, 使得非均匀压电极化场对 2DEG 的散射作用与来自 LO 声子散射的影响相比较弱. 因此, 在高温段, AlGaIn/GaN 异质结构中 2DEG 的主要散射机制为 LO 声子散射.

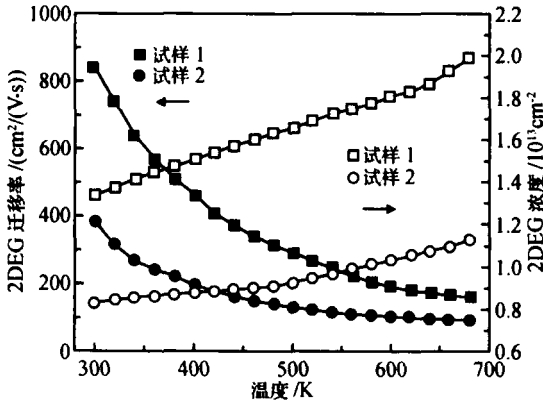


图 1 2DEG 的迁移率和浓度随温度的变化关系

Fig. 1 Temperature dependencies of the 2DEG mobility and density

为了研究在高温下 2DEG 分布及子带占据随温度的变化情况, 我们通过自洽地解薛定谔和泊松方程计算了不同温度下 AlGaIn/GaN 异质结构中 2DEG 的分布和子带占据, 详细的计算方法参见文献[11]. 图 2(a) 显示了试样 1 在不同温度下的导带势能及 2DEG 分布. 室温下计算的载流子面密度值为 $1.1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, 这与 Hall 实验测得的载流子面密度值 $1.06 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 很接近; 图 2(b) 显示了试样 1 在不同温度下 2DEG 的子带占据情况, 随着温度的增加, 第一子带电子的占据率减少, 同时, 第二和

第三子带的电子占据率增加. 即随着温度的增加, 更多的电子跃迁到了更高的子带, 在更高的子带, 由于其波函数逐渐扩展到 AlGaIn 层内部以及 GaN 体内更深的位置 (见图 2(b)), 这样, LO 声子散射的屏蔽效应减弱并且来自 AlGaIn 层内的合金无序散射增强. 因此, 2DEG 分布随温度的变化也影响 2DEG 的迁移率. 即使在 700K 高温下, 计算的第一子带电子的占据率仍有 86%, 2DEG 仍被很好地限制在异质界面处的三角阱里. 这保证了即使在 700K 高温下, 2DEG 仍具有二维输运特征.

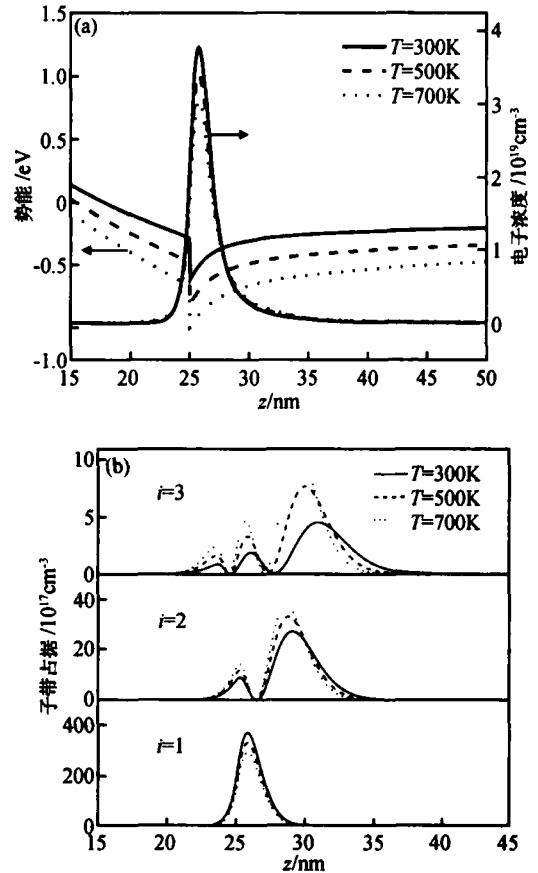


图 2 试样 1 在不同温度下的导带势能和 2DEG 分布 (a) 及 2DEG 的子带占据 (b)

Fig. 2 (a) Potential profile of the conduction band and the 2DEG distribution, and (b) Subband occupancies of the 2DEG in Sample 1 at different temperatures

图 3(a) 和 (b) 分别显示了试样 2 在不同温度下 2DEG 分布和子带占据情况. 从图中可看到, 和试样 1 比较, 由于应变弛豫导致了试样 2 中电子浓度显著下降, 计算的载流子面密度值为 $7.3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, 也与 Hall 实验测得的载流子面密度值 $8.3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 接近. 同时, 在试样 2 中由于低的 2DEG 密度, 仅仅两个子带被占据, 其 2DEG 的分布和子带占据随温度的变化规律与试样 1 是相似的.

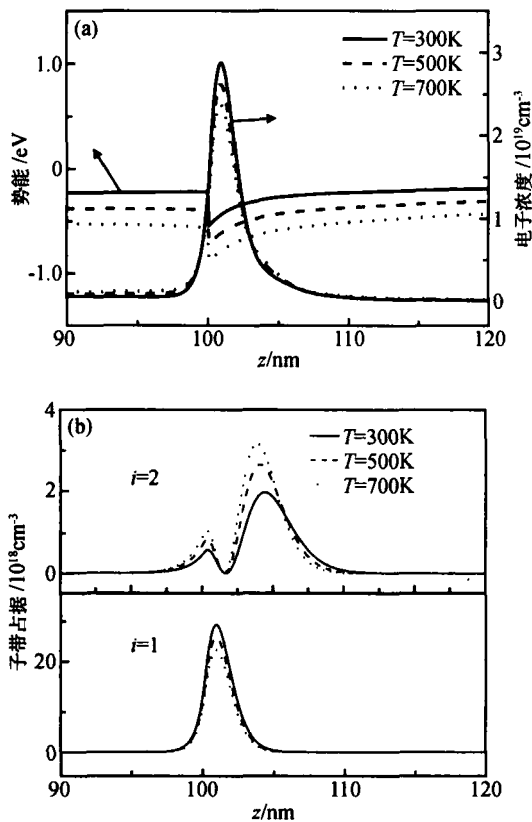


图 3 试样 2 在不同温度下的导带势和 2DEG 分布 (a) 及 2DEG 的子带占据 (b)
 Fig.3 (a) Potential profile of the conduction band and the 2DEG distribution, and (b) Subband occupations of the 2DEG in Sample 2 at different temperatures

4 结论

采用高温 Hall 测量仪对一个全应变和一个部分应变弛豫的 AlGa_xN/ GaN 异质结构中 2DEG 的高温输运特性进行了研究, 温度变化范围从室温到 680 K. 2DEG 迁移率随温度的变化趋势表明了, 在高温阶段 2DEG 的迁移率主要受 LO 声子散射限制; 在室温, 对应变弛豫的样品, 异质界面处的非均匀压电极化场对 2DEG 迁移率的散射也是一个主要的散射机制. 但随着温度的升高, LO 声子散射的作用越来越强, 使得非均匀压电极化场对 2DEG 的散射

作用与来自 LO 声子散射的影响相比相对减弱. 在室温下计算得到的载流子面密度值与 Hall 实验测得的载流子面密度值接近. 同时, 计算结果显示, 随着温度的升高, 更多的电子跃迁到更高的子带, 导致了 LO 声子散射的屏蔽效应减弱且来自 AlGa_xN 层内的合金无序散射作用增强.

参考文献

[1] Maeda N, Tsubaki K, Saitoh T, et al. High-temperature electron transport properties in AlGa_xN/ GaN heterostructures. *Appl Phys Lett*, 2001, 79:1634
 [2] Egawa T, Ishikawa H, Umeno M, et al. Recessed gate AlGa_xN/ GaN modulation-doped field-effect transistors on sapphire. *Appl Phys Lett*, 2000, 76:121
 [3] Maeda N, Saitoh T, Tsubaki K, et al. Superior pinch-off characteristics at 400 degrees C in AlGa_xN/ GaN heterostructure field effect transistors. *Jpn J Appl Phys*, 1999, Part 2, 38: L987
 [4] Arulkumaran S, Egawa T, Ishikawa H, et al. High-temperature effects of AlGa_xN/ GaN high-electron-mobility transistors on sapphire and semi-insulating SiC substrates. *Appl Phys Lett*, 2002, 80:2186
 [5] Harrison I, Clayton N W, Jeffs N J. High temperature RF characterisation of SiN passivated and unpassivated AlGa_xN/ GaN HFETs. *Phys Status Solidi A*, 2001, 188:275
 [6] Tarakji A, Hu X, Koudymov A, et al. DC and microwave performance of a GaN/ AlGa_xN MOSHFET under high temperature stress. *Solid-State Electron*, 2002, 46:1211
 [7] Wang X L, Wang C M, Hu G X, et al. RF-MBE grown AlGa_xN/ GaN HEMT structure with high Al content. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(6):1116
 [8] Chen Xiaojuan, Liu Xinyu, Shao Gang, et al. AlGa_xN/ GaN HEMT on sapphire using FC bonding. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(5):990 (in Chinese) [陈晓娟, 刘新宇, 邵刚, 等. 基于 FC 技术的 AlGa_xN/ GaN HEMT. *半导体学报*, 2005, 26(5):990]
 [9] Shen B, Someya T, Arakawa Y. Influence of strain relaxation of the Al_xGa_{1-x}N barrier on transport properties of the two-dimensional electron gas in modulation-doped Al_xGa_{1-x}N/ GaN heterostructures. *Appl Phys Lett*, 2000, 76: 2746
 [10] Albrecht J D, Wang R P, Ruden P P, et al. Electron transport characteristics of GaN for high temperature device modeling. *J Appl Phys*, 1998, 83:4777
 [11] Kong Y C, Zheng Y D, Zhou C H, et al. Study of two-dimensional electron gas in AlN/ GaN heterostructure by a self-consistent method. *Phys Status Solidi B*, 2004, 241:840

High Temperature Transport Properties of 2DEG in AlGa_N/Ga_N Heterostructures^{*}

Tao Chunmin^{1,†}, Tao Yaqi¹, Chen Cheng^{1,3}, Kong Yuechan¹, Chen Dunjun¹, Shen Bo²,
Jiao Gang³, Chen Tangsheng³, Zhang Rong¹, and Zheng Youdou¹

(1 Key Laboratory of Advanced Photonic and Electronic Materials, Department of Physics,
Nanjing University, Nanjing 210093, China)

(2 State Key Laboratory of Artificial Microstructure and Mesoscopic Physics, School of Physics,
Peking University, Beijing 100871, China)

(3 Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing 210016, China)

Abstract : The transport properties of the two-dimensional electron gas (2DEG) in fully strained and a partially strain-relaxed Al_{0.22}Ga_{0.78}N/GaN heterostructures at temperatures ranging from 300 to 680 K are investigated with Hall measurements. The results indicate that the 2DEG mobility is primarily limited by LO phonon scattering processes at high temperatures. The calculated results also show that the 2DEG distribution gradually expands to the inside of the AlGa_N and Ga_N layers with increasing temperature due to the electron transfer to the higher order subbands. Hence, the effect of screening on LO phonon scattering is weakened and the alloy scattering of the AlGa_N layer on the 2DEG becomes stronger.

Key words : AlGa_N/Ga_N heterostructure; 2DEG; high-temperature transport

EEACC : 2530B; 2520D

Article ID : 0253-4177(2006)07-1251-04

^{*}Project supported by the Special Funds for Major State Basic Research Projects of China (No. G20000683), the National Natural Science Foundation of China (Nos. 60406002, 60325413, and 60136020), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK2003411), and the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2002AA305304)

[†]Corresponding author. Email: woyan82@eyou.com

Received 2 September 2005, revised manuscript received 24 November 2005

©2006 Chinese Institute of Electronics