

Al_xGa_{1-x}N/GaN 调制掺杂异质结构的子带性质研究*

郑泽伟¹⁾²⁾ 沈波^{2)†} 桂永胜³⁾ 仇志军³⁾ 唐宁²⁾ 蒋春萍³⁾
张荣²⁾ 施毅²⁾ 郑有²⁾ 郭少令³⁾ 褚君浩³⁾

¹⁾ 解放军理工大学理学院, 南京 211101)

²⁾ 南京大学物理系, 南京 210093)

³⁾ 中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

(2003 年 3 月 26 日收到, 2003 年 5 月 4 日收到修改稿)

通过低温和强磁场下的磁输运测量研究了 Al_{0.22}Ga_{0.78}N/GaN 调制掺杂异质结构中 2DEG 的子带占据性质和子带输运性质. 在该异质结构的磁阻振荡中观察到了双子带占据现象, 并发现 2DEG 的总浓度随第二子带浓度的变化呈线性关系. 得到了该异质结构中第二子带被 2DEG 占据的阈值电子浓度为 $7.3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. 采用迁移率谱技术得到了不同样品的分别对应于第一和第二子带的输运迁移率. 发现当样品产生应变弛豫时第一子带的电子迁移率骤然下降, 而且第二子带的电子迁移率远大于第一子带的电子迁移率. 用电子波函数分布和应变弛豫时的失配位错散射解释了上述现象. 同时进一步说明了界面粗糙散射和合金无序散射是决定 Al_xGa_{1-x}N/GaN 异质结构中 2DEG 迁移率的主要散射机理.

关键词: AlGa_x/Ga_{1-x}N 异质结, 二维电子气, 子带占据, 输运迁移率

PACC: 7200, 7215G, 7280E

1. 引言

Al_xGa_{1-x}N/GaN 异质结构由于在高温、高频和大功率场效应晶体管方面的应用前景而受到了人们的普遍关注^[1-3]. 与 Al_xGa_{1-x}As/GaAs 异质结构相比, 该异质结构具有较大的导带不连续性和较强的极化效应, 异质界面处的二维电子气(2DEG)浓度达 10^{13} cm^{-2} 量级^[4]. 同时, 异质结构中的 2DEG 被限制在非常窄的区域内, 使得 2DEG 量子化现象更加显著. 特别是第一和第二子带能级间的距离非常大, 因而, 该异质结构中的激发子带的占据在磁输运实验中很难被观察到. 所以, 对该异质结构子带性质的研究既是研发新一代高性能 GaN 基微波功率器件的需要, 同时对丰富和发展半导体低维结构物理学也有重要学术意义. 磁输运测量一直是研究 2DEG 输

运性质的有效方法^[5-8]. 本论文通过在低温和强磁场下的磁输运测量, 研究了 Al_xGa_{1-x}N/GaN 调制掺杂异质结构的多子带占据性质和不同子带的输运性质.

2. 材料制备和实验

图 1 为 Al_xGa_{1-x}N/GaN 调制掺杂异质结构示意图. 样品用金属有机化学气相淀积方法在蓝宝石衬底的(0001)面上生长. 生长前先在蓝宝石衬底的(0001)面上生长一层非成核的 GaN 缓冲层, 生长温度为 488°C. 接着在 1071°C 的温度下生长一层 2.0 μm 厚的非故意掺杂 GaN(*i*-GaN)层. 然后在 1080°C 的温度下生长一层非故意掺杂的 Al_{0.22}Ga_{0.78}N(*i*-AlGa_{0.22}N)作为隔离层和 Si 掺杂的 Al_{0.22}Ga_{0.78}N(*n*-AlGa_{0.22}N)层. 实验所用样品的结构如表 1 所示. x 射线

* 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: 60136020 和 60290080)和国家高科技研究发展计划项目(批准号: 2002AA305304)资助的课题.

† E-mail: bshen@nju.edu.cn

衍射倒空间谱表明,在样品 1、样品 2、样品 5 和样品 6 中 GaN 上的 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}$ 层是赝势生长的,而在样品 3 和样品 4 中是晶格部分弛豫的^[9].

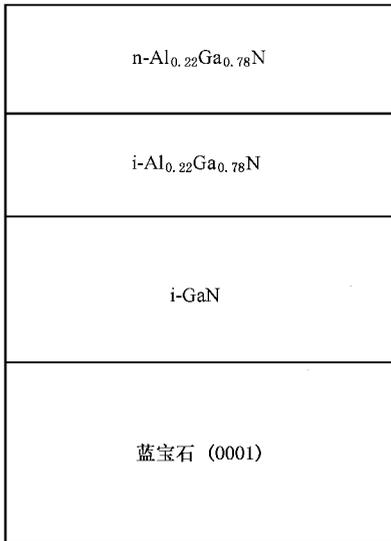


图 1 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ 调制掺杂异质结构样品的结构示意图

实验中霍尔测量和磁输运测量均采用范德堡法.77K 下测得的样品霍尔迁移率如表 1 所示.磁输运测量在 1.5K 下进行,磁场扫描范围在 0—9T 之间.

表 1 样品结构和 1.4K 下分别对应样品第一子带和第二子带 2DEG 的输运迁移率 μ_1 和 μ_2 ,以及在 77K 下测得的霍尔迁移率 μ_H

| 样品编号 | 隔离层厚度/nm | n-AlGaN /nm | μ_1 ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$) | μ_2 ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$) | μ_H ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$) |
|------|----------|-------------|--|--|--|
| 1 | 3 | 25 | 1839 | — | 2730 |
| 2 | 3 | 50 | 1219 | 5626 | 3070 |
| 3 | 3 | 75 | 416 | — | 915 |
| 4 | 3 | 100 | 456 | 8347 | 978 |
| 5 | 5 | 25 | 1752 | — | 3060 |
| 6 | 10 | 25 | 1756 | — | 4450 |

3. 实验结果和讨论

3.1. $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ 调制掺杂异质结构的子带占据性质

图 2 为样品 4 的纵向磁阻随与样品表面垂直的磁场的变化曲线.从表 1 可知该样品具有较低的霍

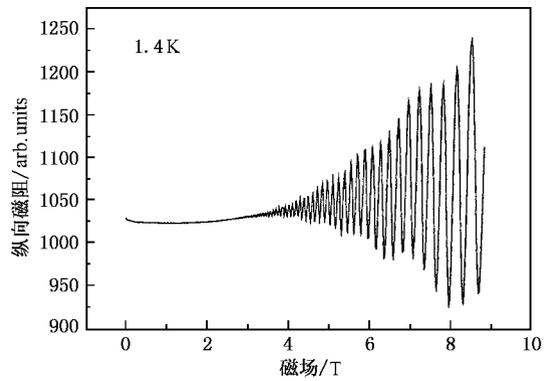


图 2 1.4K 温度下 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ 调制掺杂异质结构的纵向磁阻随与表面垂直的磁场的变化

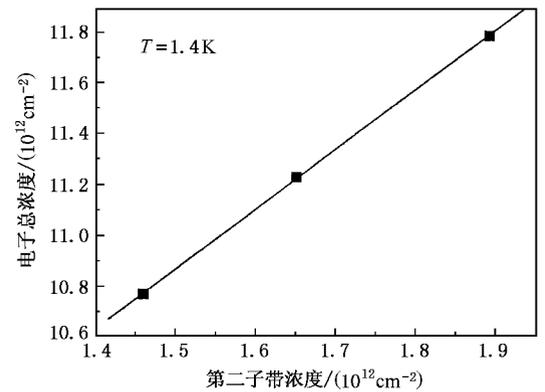


图 3 1.4K 温度下 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ 调制掺杂异质结构界面处三角势阱中 2DEG 总浓度随第二子带 2DEG 浓度的变化

尔迁移率,但在磁阻曲线中出现了非常强的舒布尼科夫-德哈斯(SdH)振荡.其他样品也出现了很强的 SdH 振荡.这里感兴趣的是 SdH 振荡的双周期性. SdH 振荡的双周期特性表明,异质界面处三角势阱中至少有两个子带被 2DEG 占据.从高场振荡磁阻可直接得到分别对应于第一子带和第二子带的 2DEG 浓度.对磁阻曲线用快速傅里叶变换也可分辨出两个子带,并且所得到的两个子带的浓度和直接由振荡周期得到的非常吻合.这表明所用样品中有两个子带被 2DEG 占据.考虑到数据处理的准确性,这里只给出磁阻曲线没有观察到明显并行电导的样品 3、样品 4 和样品 6 三块样品 2DEG 总浓度随第二子带 2DEG 浓度的变化,如图 3 所示.从图 3 可以看出,2DEG 总浓度随第二子带浓度的变化呈非常好的线性关系.这一结果与 $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}/\text{GaAs}$ 异质结构的实验结果以及 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 异质结构的实验结果和理论结果一致^[10-12],从而可以外推出第

二子带被占据时 2DEG 的阈值浓度为 $7.3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. 费米能级 E_F 、各子带能级 E_i 和第 i 个子带 2DEG 浓度 N_i 间的关系可表示为

$$E_F = E_i + N_i \pi \hbar^2 / m^* \quad (1)$$

式中 m^* 为电子有效质量, \hbar 为折合普朗克常数. 取 $N_i = 7.3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $m^* = 0.23 m_e^{[13]}$ 时可得到 $E_F - E_1 = 75 \text{ meV}$. 表明, 当该异质结构三角势阱中的第二子带刚要被 2DEG 占据时第一和第二子带的能级相距 75 meV .

3.2. $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ 调制掺杂异质结构的子带输运性质

半导体中的电子输运特性通常由输运散射时间 τ_i (或输运迁移率 μ_i) 表征. 如果 $Q(\theta)$ 正比于散射概率, θ 为散射角, 则输运散射时间由下式给出:

$$\frac{1}{\tau_i} = \int_0^\pi Q(\theta) (1 - \cos\theta) d\theta, \quad (2)$$

式中有一个权重因子 $(1 - \cos\theta)$ 项, 所以只有大角散射才会对输运散射时间有显著贡献.

研究者们已经在 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结构的散射机理方面作了大量的工作, 认为界面粗糙散射和合金无序散射在决定二维电子气的迁移率方面起着非常重要的作用^[14]. 由前面的结果可知, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结构界面三角势阱中的最低两个子带能级距离可达 75 meV 以上, 所以这两个子带中电子的分布会有很大的不同, 因而在散射机理上也可能存在较大的差异. 散射机理的差异直接表现在两个子带电子迁移率的不同. 用传统的霍尔方法不能将不同子带电子的迁移率区分开而只能得到迁移率的平均值; 不同子带中 2DEG 的输运迁移率可以用迁移率谱技术得到^[15-18]. 得到的不同样品对应于第一子带和第二子带的输运迁移率 (μ_1 和 μ_2) 如表 1 所示. 从表中可以发现, 对赝势生长样品 (样品 2) 和部分弛豫样品 (样品 4) 其第二子带中电子的输运迁移率均远大于第一子带电子的输运迁移率. 但与赝势生长的样品 2 相比 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}$ 层产生应变弛豫的样品 4, μ_1 骤然减小而 μ_2 却相对增加.

我们知道, 在 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结构中, 界面处的压电场可高达 $\sim \text{MV}/\text{cm}^{[4]}$. 这一强的压电场将对该异质结构中的 2DEG 输运性质产生重要的影响. 当 GaN 上的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 层产生应变弛豫时将在界面附近产生失配位错. 因为在 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 层中位错芯附近的应变与 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 中其他地方不同, 而

界面处的压电场由 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 中的应变决定, 所以, 当 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 层产生应变弛豫时界面处的压电场将产生较大的起伏. 这一不均匀的极化场将对第一子带中的电子产生很强的散射作用. 所以, 样品的势垒层产生应变弛豫时第一子带电子输运迁移率骤然降低.

由上面的结果知道 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ 异质界面处三角势阱中的第二子带和第一子带的能级相距 75 meV 以上, 所以和第一子带相比第二子带的电子波函数将远离界面扩展到 GaN 层中. 界面粗糙散射和合金无序散射都为短程散射势, 由于第二子带电子分布远离界面, 与第一子带的电子相比第二子带电子受到的这两种散射作用将大大减弱. 因而, 第二子带电子的输运迁移率远大于第一子带的输运迁移率.

当 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}$ 势垒层产生部分弛豫时, 异质界面处的三角势阱将变浅, 而数据显示这时这两个子带间距并没有明显的变化, 从而第二子带的电子进一步远离界面. 这样, 第二子带电子不但受到界面粗糙散射和合金无序散射进一步变弱而且所受到的非均匀电场散射也变弱, 所以, $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}$ 层产生应变弛豫时第二子带电子的迁移率不但没有减小反而有所增加. 这一结果进一步证明了界面粗糙散射和合金无序散射在限制 2DEG 的迁移率方面起着非常重要的作用.

4. 结 论

本文通过低温和强磁场下的磁输运测量, 研究了 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ 调制掺杂异质结构中 2DEG 的子带占据性质和子带输运性质. 在该异质结构的磁阻振荡中观察到了双子带占据现象, 并发现 2DEG 的总浓度随第二子带浓度的变化呈线性关系. 得到了第二子带被 2DEG 占据的阈值电子浓度为 $7.3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, 这时第一和第二子带能级相距 75 meV . 采用迁移率谱技术得到了不同样品分别对应于第一和第二子带的输运迁移率. 发现当样品产生应变弛豫时第一子带的电子迁移率骤然下降, 而且第二子带的电子迁移率远大于第一子带的电子迁移率. 产生应变弛豫时样品中第一子带的电子迁移率骤然下降, 被认为是由于失配位错在界面附近产生的非均匀压电场对第一子带电子的散射造成的. 第二子带的电子迁移率远大于第一子带的电子迁移率, 被认为是由

于第二子带电子分布远离异质结构界面,使界面粗糙散射和合金无序散射减弱的原因.实验结果进一步验证了界面粗糙散射和合金无序散射这两种散射

机理是决定 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结中 2DEG 迁移率的主要散射机理.

-
- [1] Khan M A , Chen Q , Shur M S , Mermott B T , Higgins J A , Burn J , Schaff W and Eastman L F 1996 *Electron . Lett .* **32** 357
- [2] Wu Y F , Keller B P , Keller S , Kapolnek D , Kozodoy P , Denbaars S P and Mishra U K 1996 *Appl . Phys . Lett .* **69** 1438
- [3] Binari S C , Redwing J M , Kelner G and Kruppa W 1997 *Electron . Lett .* **33** 242
- [4] Asbeck P M , Yu E T , Lau S S , Sullivan G J , Hove J V and Redwing J 1997 *Electron . Lett .* **33** 1230
- [5] Wong L W , Cai S J , Li R , Wang K , Jiang H W and Chen M 1998 *Appl . Phys . Lett .* **73** 1391
- [6] Tsui D C 1973 *Phys . Rev . B* **8** 2657
- [7] Zheng Y D , Chang Y H , McCombe B D , C. Farrow R F , Temofonte T and Shirland F A 1986 *Appl . Phys . Lett .* **49** 1187
- [8] Manfra M J , Pfeiffer L N , West K W , Stormer H L , Baldwin K W , Hsu J W P , Lang D V and Molnar R J 2000 *Appl . Phys . Lett .* **77** 2888
- [9] Shen B , Someya T and Arakawa Y 2000 *Appl . Phys . Lett .* **76** 2746
- [10] Störmer H L *et al* 1982 *Solid State Commun .* **41** 707
- [11] Razeghi M , Maurel P , Omnés F , Ben S Armor , Dmowski L and Portal J C 1986 *Appl . Phys . Lett .* **48** 1267
- [12] Ando T , 1982 *J . Phys . Soc . Jap .* **51** 3893
- [13] Wang Y J , Kaplan R , Ng H K , Doverspike K , Gaskill D K , Ikedo T , Akasaki I and Amono H 1996 *J . Appl . Phys .* **79** 8007
- [14] Antoszewski J , Gracey M , Dell J M , Faraone L , Fisher T A , Parish G , Wu Y F and Mishra U K 2000 *J . Appl . Phys .* **87** 3900
- [15] Gui Y S *et al* 1998 *Acta Phys . Sin .* **47** 1354 [in Chinese] 桂永胜等 1998 *物理学报* **47** 1354]
- [16] Beck W A , Anderson J R 1987 *J . Appl . Phys .* **62** 541
- [17] Meyer J R , Hoffman C A , Bartoli F J , Arnold D A , Sivananthan S , Faurie J P 1993 *Semicond . Sci . Technol .* **8** 805
- [18] Antoszewski J , Faraone L 1996 *J . Appl . Phys .* **80** 3881

Study on the subband properties of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ modulation-doped heterostructures^{*}

Zheng Ze-Wei^{1,2)} Shen Bo²⁾ Gui Yong-Sheng³⁾ Qiu Zhi-Jun³⁾ Tang Ning²⁾ Jiang Chun-Ping³⁾
Zhang Rong²⁾ Shi Yi²⁾ Zheng You-Dou²⁾ Guo Shao-Lin³⁾ Chu Jun-Hao³⁾

¹⁾*Institute of Science, PLA University of Science & Technology, Nanjing 211101, China*

²⁾*Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China*

³⁾*National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China*

(Received 26 March 2003; revised manuscript received 4 May 2003)

Abstract

The subbands occupation and subband transport properties in modulation-doped $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$ heterostructures are studied by means of magnetotransport measurements at low temperatures and high magnetic fields. The occupation of two subbands is observed from the Shubnikov-de Haas oscillations. It is found that the total density of the two-dimensional electron gas (2DEG) as a function of the electron sheet density in the second subband is linear. The threshold of the 2DEG density that the second subband begins to be occupied is $7.3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. The transport mobility of the 2DEG in the two subbands is obtained by using the mobility spectrum technique. It is found that the transport mobility in the first subband decreases significantly when the relaxation of the $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}$ barrier occurs. The electron mobility in the second subband is much larger than that in the first one. The results indicate that the interface roughness scattering and the alloy disorder are the main mechanisms in determining the 2DEG mobility in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ heterostructures.

Keywords: AlGa_N/Ga_N heterostructures, two-dimensional electron gas, subband occupation, transport mobility

PACC: 7200, 7215G, 7280E

^{*} Project supported by the Special Funds for Major State Basic Research Projects of China (Grant No. G20000683), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60136020 and 60290080), and the National High Technology Research & Development Project of China (Grant No. 2002AA305304)