

AlGaIn/AlN/GaN 结构中二维电子气的输运特性*

周忠堂^{1)†} 郭丽伟¹⁾ 邢志刚¹⁾ 丁国建¹⁾ 谭长林¹⁾ 吕力¹⁾
刘建²⁾ 刘新宇²⁾ 贾海强¹⁾ 陈弘¹⁾ 周均铭¹⁾

1) 北京凝聚态物理国家实验室, 中国科学院物理研究所表面物理国家重点实验室, 北京 100080)

2) 中国科学院微电子研究所化合物半导体器件实验室, 北京 100029)

(2007 年 3 月 13 日收到, 2007 年 4 月 29 日收到修改稿)

对使用金属有机物汽相沉积法生长的 AlGaIn/AlN/GaN 结构进行的变温霍尔测量, 测量结果指出在 AlN/GaN 界面处有二维电子气存在且迁移率和浓度在 2 K 时分别达到了 $1.4 \times 10^4 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $9.3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, 且在 200 K 到 2 K 范围内二维电子气的浓度基本不变, 变磁场霍尔测量发现只有一种载流子(电子)参与导电. 在 2 K 温度下, 观察到量子霍尔效应, Shubnikov-de Haas (SdH) 振荡在磁场约为 3 T 时出现, 证明了此结构呈现了典型的二维电子气行为. 通过实验数据对二维电子气散射过程的半定量分析, 推出量子散射时间为 0.23 ps, 比以往报道的 AlGaIn/GaN 结构中的散射时间长, 说明引入 AlN 层可以有效减小合金散射, 进一步的推断分析发现低温下以小角度散射占主导地位.

关键词: AlGaIn/AlN/GaN 结构, 二维电子气, Shubnikov-de Haas 振荡, 高电子迁移率晶体管

PACC: 7320D

1. 引言

由于 GaN 材料具有饱和电子速度大, 耐高温, 抗辐射, 化学稳定性好, 击穿电压高等优点, 使 GaN 基材料成为了制作下一代高速、高温、大功率高电子迁移率场效应晶体管(HEMT)的首选材料. 同时, GaN 基 HEMT 材料中存在着很强的压电极化和自发极化效应^[1], 这是它与 GaAs 基 HEMT 材料的最大区别, 这一极化效应使非故意掺杂的 AlGaIn/GaN 异质结界面处存在着高达 10^{13} cm^{-2} 浓度的二维电子气(2DEG). HEMT 的两个重要物理参数是载流子的迁移率 μ 和浓度 n , 提高 μ 和 n 的乘积可以增加 HEMT 器件的输出功率. 为了提高器件的性能, 科研人员发现在 AlGaIn 和 GaN 中间生长一层很薄的 AlN 层可以明显提高 2DEG 迁移率 μ , 对载流子浓度没有太大的影响^[2], 这样一来便可以提高 $n\mu$ 的乘积. 在 AlGaIn/GaN 之间引入薄的 AlN 层(形成 AlGaIn/AlN/GaN 结构)使得 AlN/GaN 的导带偏移(band offset)比 AlGaIn/GaN 的要大, 从而减少了 2DEG 穿透

到 AlGaIn 层中的概率, 减少了 2DEG 受到 AlGaIn 层的合金散射, 而合金散射在传统的 AlGaIn/GaN 结构中制约着 2DEG 迁移率的提高. 大量的研究表明通过插入 AlN 层可使 2DEG 的迁移率提高^[3-8], 而且 Elhamri 等人对 SiC 衬底上的 2DEG 的散射机理进行了细致的讨论^[9], 但对蓝宝石衬底上生长的 AlGaIn/AlN/GaN 结构中 2DEG 的散射机理的细致研究比较少, 所以本文系统地研究了 AlGaIn/AlN/GaN 结构中 2DEG 的输运性质以及散射机理, 对指导研制高速、高温、大功率 HEMT 器件有重要意义. 本文报道了对 AlGaIn/AlN/GaN 结构中 2DEG 输运性质以及散射机理的研究, 通过变温霍尔测量得到了温度为 2 K 时 2DEG 迁移率和浓度分别为 $1.4 \times 10^4 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $9.3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, 通过变磁场霍尔测量证明了其中只有一种载流子参与导电. 在 2 K 下, 观测到 Shubnikov-de Haas (SdH) 振荡.

2. 实验

实验中采用金属有机物化学汽相沉积方法

* 国家自然科学基金(批准号: 10474126, 10574148)和国家重点基础研究发展计划(973)项目(批准号: 2002CB311900)资助的课题.

† E-mail: ztzhou@mails.gucas.ac.cn

(MOCVD)生长 AlGaN/AlN/GaN 结构,生长使用的衬底为 c 面取向蓝宝石(Al_2O_3),AlGaN/AlN/GaN 的结构参数为 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ (20 nm) AlN (1 nm) GaN (100 nm)沟道层/半绝缘 GaN(3 μm),此结构中的 AlN 的厚度, $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 中的 Al 组分以及厚度通过 X 射线双晶衍射得到.样品被制作成标准的霍尔桥形状(图 1),我们使用物性测量仪(PPMS)进行输运特性测量,用于变温霍尔测量的磁场为 1 T,温度变化范围为 2—300 K.变磁场测量的磁场变化范围为 0—2 T.在低温下 SdH 振荡测量中,使用了标准的低频,锁相放大技术,为了防止样品发热,所加驱动电流为 0.1 μA .

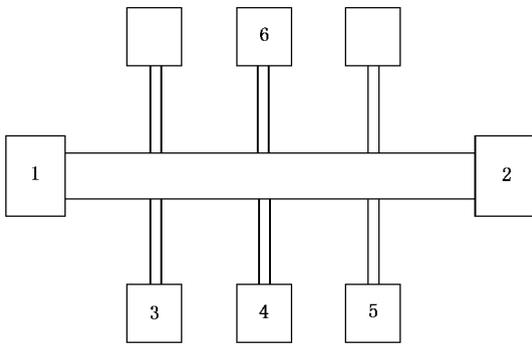


图 1 霍尔桥的示意图 1 2 之间通驱动电流 i ; 3 5 之间测量样品的磁阻 R ; 6 之间测量样品的霍尔电压

霍尔桥的制作过程如下:首先在样品的表面使用等离子体辅助汽相沉积法(PECVD)沉积 500 nm 的 SiO_2 作保护层,然后使用霍尔桥的光刻版对其进行曝光,曝光后用 1:10 的 HF 酸将没有图形地方的 SiO_2 保护膜清洗干净,使用反应离子刻蚀(RIE)方法进行刻蚀,刻蚀深度为 500 nm.刻出图形台面后把图形上 SiO_2 保护膜清洗干净,采用电子束蒸发的方法在样品表面蒸发 Ti/Al/Ni/Au 金属,然后退火合金,形成欧姆接触,为便于在实验过程中压焊金丝引线,在欧姆接触金属的表面用电子束蒸发约 700 nm 的金属金,使用压焊机压焊直径为 50 μm 的金丝作为引线.

3. 实验结果以及分析

由于 AlN 层的引入增加了导带偏移(band offset)使 2DEG 的波函数更接近于 AlN/GaN 异质结界面,并且减少了 2DEG 受到 AlGaN 层的合金散射,所以此异质结界面的晶体结构对 2DEG 的输运特性就起着重要作用,特别是在低温下,异质结界面的粗

糙度散射和异质结材料中的位错散射成为影响 2DEG 输运特性的重要散射机理,较大的异质界面粗糙度和较高的位错密度会导致 2DEG 迁移率的下降.因此我们用透射电子显微镜(TEM)的明场像研究了此结构中各个分界面的晶体结构情况,其结果如图 2 所示,图中可以清楚直观的看到 AlN 层,并且可以看到各个界面都很陡峭,在界面处几乎观察不到有堆垛位错(stack fault)出现.

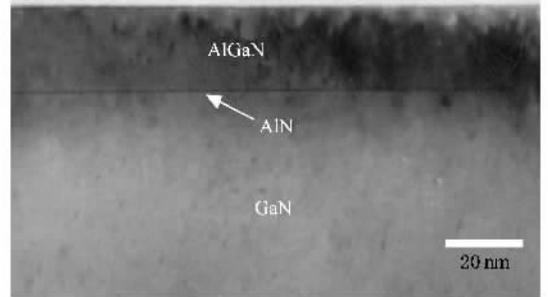


图 2 TEM 明场像 衍射矢量 $g = 002$

我们对此样品做了变温霍尔测量,图 3 为测量结果,从图 3 中可以看到,电子浓度 n 在 200 K 以下几乎不发生变化,迁移率 μ 在 100 K 以下也基本保持不变,图中的微小起伏是测量误差所致.在温度为 2 K 时,2DEG 的浓度为 $9.3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$,迁移率为 $1.4 \times 10^4 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.载流子浓度和迁移率随温度的变化趋势具有典型的 2DEG 的特征^[10],这个实验证明了在 AlN/GaN 界面处存在着 2DEG.在 200 K 以下电子浓度几乎不变,说明在样品中没有平行导电.低温下 2DEG 的迁移率相对于室温时候的 $2016 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 高近一个数量级的主要原因是由于低温下声子散射被抑制以及电离杂质散射被高浓度电子屏蔽.

为了进一步研究 2DEG 的散射机理,我们对样品进行了低温变磁场霍尔测量.约化电导(reduced conductance) X 和 Y 随着磁场 B 的变化曲线显示在图 4 中,其中约化电导 X 和 Y 分别是 $X = \sigma_{xx}/\sigma_0$ 和 $Y = 2\sigma_{xy}/\sigma_0$,其中 σ_{xx} 磁阻电导, σ_{xy} 霍尔电导, σ_0 是零磁场下样品的电导.根据 Kim 等人^[11]关于单一载流子导电的判据可知,对应于约化电导 X 值为 0.5 的磁场 B ,对应的 Y 值有最小值.从图 4 中可以看到,本实验结果符合单一载流子参与导电的判据,说明只有一种载流子参与导电.

为了对 2DEG 的散射机理进行更深入的研究,我们对此样品进行了 Shubnikov-de Haas 振荡测量,

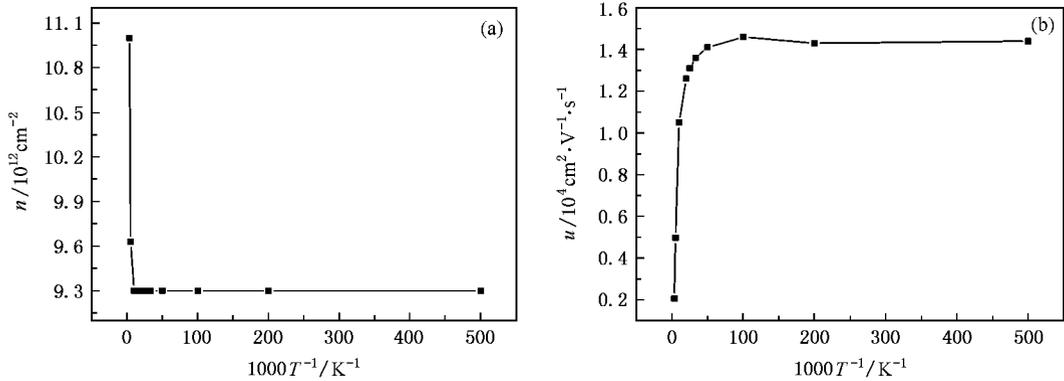


图3 变温霍尔测量结果 (a)2DEG 电子浓度随着温度变化曲线 (b)2DEG 迁移率随着温度变化曲线

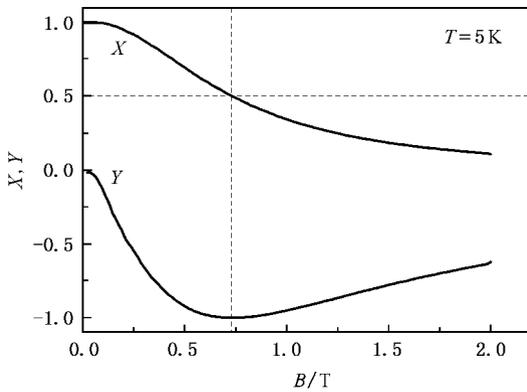


图4 约化电导率 X 和 Y 随着磁场的变化曲线

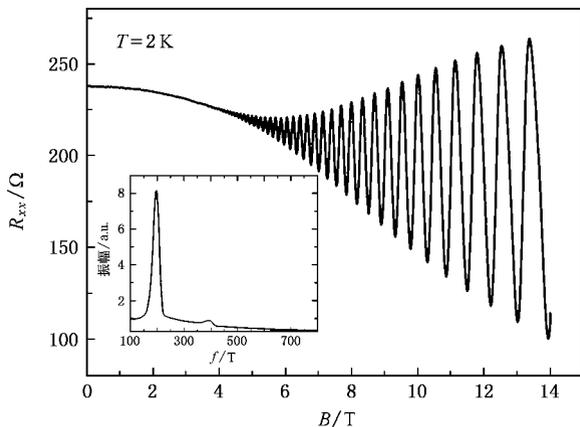


图5 $T=2 \text{ K}$ 时的 SdH 振荡, 左下角的插图为将 SdH 振荡曲线进行 FFT 变换得到的频谱图

其测量结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出, 在磁场接近于 3T 的地方, 磁阻 R_{xx} 开始出现振荡, 说明此结构中的载流子具有二维特性。我们注意到 Elhamri^[9] 等人在 SiC 上生长的 AlGa_N/AlN/GaN 结构中 2DEG 的 SdH 振荡的起振

磁场为 2 T, 比本实验中提到的 3 T 要小一些, 这主要是由于 SdH 测量的温度不同造成的, 本实验中 SdH 测量温度为 2 K 而文献 [9] 中的为 1.2 K, 对于 2DEG 而言, 温度越低越容易在较小的磁场下观察到 SdH 振荡。图 5 中的插图为将磁阻 R_{xx} 随 $1/B$ 的振荡曲线进行快速傅里叶 (FFT) 变换得到的频率谱, 可以从图中看到, 在整个区间上只有一个频率, 主峰右边强度很小的峰为主峰的谐振峰。因为此频率只与 2DEG 的浓度有关^[12], 即 $f = \frac{h}{2e} n$, 其中的 h 为普朗克常数, e 为电子电荷, n 为电子浓度。所以只有一个频率说明所有电子只占据了一个子能级。并且根据所得的频率计算得到的电子浓度为 $9.25 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, 这一数值与变温霍尔测量中得到的电子浓度相当接近。在没有 AlN 插入层的 AlGa_N/GaN 结构中经常观测到负磁阻现象, 也就是弱局域化现象^[13, 14], 而在我们的 SdH 振荡测量当中, 低场时并没有观察到这一现象, 很有可能是由于 AlN 插入层的引入, 阻止了 2DEG 的波函数穿透到 AlGa_N 层中, 从而减小了 AlGa_N 中的杂质和合金散射。

伴随 SdH 振荡的量子霍尔平台显示在图 6 中, 从图中可以清晰地看到霍尔电阻 R_{xy} 随着磁场变化出现一系列的平台, 其中插图是磁场为 6—10 T 的放大图。图中霍尔平台的出现, 也进一步证明此结构存在着高质量的 2DEG, 霍尔平台比较短是由于电子浓度较高和所施加的磁场较小造成的^[9]。另外值得一提的是, 在这么高浓度的 2DEG 情形下, 在这样的温度和磁场下观测到量子霍尔平台是比较少见的。

依据上述的实验结果, 可对 2DEG 的散射机理进行详细的分析。2DEG 的磁阻主要受到两种散射

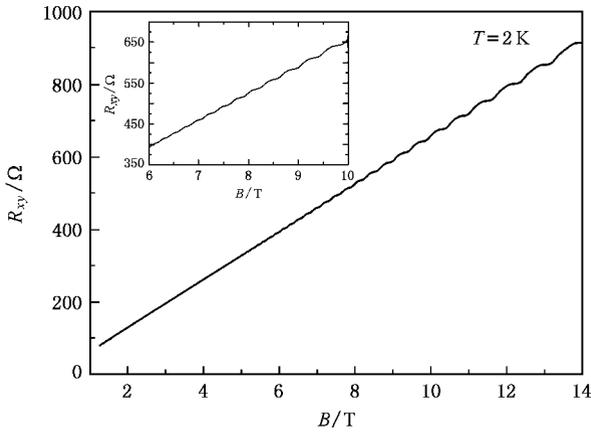


图6 霍尔电压随着磁场变化曲线 插图为磁场为6—10 T时候的量子霍尔平台放大图

机理的影响；一种是经典散射，用经典散射时间（classic scattering time） τ_c 描述和另一种是量子散射，用量子散射时间（quantum scattering time） τ_q 描述。经典散射时间 τ_c 可以由公式 $\mu = \frac{e\tau_c}{m^*}$ 得到，其中 m^* 为电子有效质量，本实验中我们取为 $0.22m_0$ ， m_0 为自由电子质量， μ 为 2DEG 的低场迁移率， e 为电子电荷。根据前面得到 2 K 时的迁移率 $1.4 \times 10^4 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ，可以推出经典散射时间为 1.8 ps。经典散射时间主要由大角度散射来决定，其中包括离子散射，界面粗糙散射等。量子散射与朗道能级的一种碰撞展宽（collision bordering）有关，而且与各种角度的散射事件都敏感，可以通过 SdH 振荡的振幅计算得出。

由于此样品中 2DEG 只占据一个子能级，并且忽略高次谐振，根据下式可以推出量子散射时间^[15-18]：

$$\ln\left(\frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R_0} \frac{\text{sink}(\chi)}{\chi}\right) = C - \left(\frac{\pi m^*}{et\tau_q}\right) \frac{1}{B},$$

其中 $\chi = \frac{2\pi^2 k_B T}{\eta \omega_c}$ ， $\omega_c = \frac{eB}{m^*}$ ， τ_q 为量子散射时间， k_B 是玻尔兹曼常数， η 是约化普朗克常数， m^* 为电子的有效质量， B 是磁场， ΔR 为 SdH 振荡的振幅， R_0 为零磁场下的电阻， C 在给定温度下的一常数。使用图 5 中的 SdH 振荡数据，另外根据上述公式以 $1/B$ 为横坐标，以 $\ln\left(\frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R_0} \frac{\text{sink}(\chi)}{\chi}\right)$ 为纵坐标作图，从而得到图 7 中的一系列点，然后进行拟合得到斜率，推出量子散射时间为 0.23 ps。

参考文献 9 中提到的 2DEG 的量子散射时间

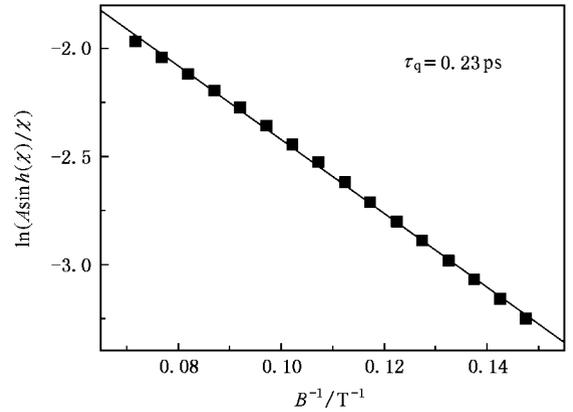


图7 根据 SdH 振荡数据利用公式所绘制的 Dingle 图

(0.28 ps) 比本实验中的略长些，其中很重要的原因就是样品生长时候所采用的衬底的不同，参考文献 [9] 中采用 SiC 作为衬底生长的样品的晶体质量要略优于本实验中采用 Sapphire 作为衬底生长的样品，因为 GaN 和 SiC 的失配较 Sapphire 要小，所以在 SiC 上外延生长的 GaN 晶体晶格更完整一些，其中包含的位错密度也更小一些，这也导致了低温下本实验中 2DEG 迁移率要低于参考文献 [9] 中 2DEG 的迁移率。但对比具有相似的载流子浓度和迁移率的 AlGaIn/GaN 结构^[19-23]，本实验中 2DEG 的量子散射时间有所增加，表明引入 AlN 层有效抑制了大角度和小角度散射。通常用 τ_c/τ_q 值的大小判断究竟是哪一种散射机理在输运过程中占主导地位，如果界面粗糙度散射占主导地位，那么此比值接近于 1，如果小角度散射占主导地位，则这一比值会大于 1。在此实验中， τ_c/τ_q 的比值为 8 左右，说明此样品中的散射是小角度散射占主导地位。

4. 结 论

本文报道了生长在蓝宝石衬底上的 AlGaIn/AlN/GaN 结构中 2DEG 的输运特性和微观散射机理。通过变温霍尔测量，研究了在不同温度下 2DEG 的迁移率和浓度。通过低温下变磁场霍尔测量，发现只有一种载流子参与导电过程，且几乎不存在平行导电。在温度为 2 K，磁场强度为 3 T 时观测到了 SdH 振荡，说明此样品中的载流子具有二维性质。通过对 SdH 振荡的分析，发现其中的 2DEG 只占据了一个子能级，并且推出了它的经典散射时间和量子散射时间，通过分析 τ_c/τ_q 值可以发现此结构中的散射

以小角度散射占主导地位, AlN 层的引入有效地抑制了多种散射机理, 同时也分析了分别使用 SiC 和

Sapphire 作为衬底对所生长的 AlGa_N/AlN/GaN 结构中 2DEG 输运特性的影响.

- [1] Ambacher B ,Foutz J ,Smart J ,Shealy R ,Weimann N G ,Chu K , Murphy M ,Sierakowski A J ,Schaff W J ,Eastman L F ,Dimitrov R , Mitchell A ,Stutzmann M 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 334
- [2] Hsu L ,Walukiewicz W 2001 *J. Appl. Phys.* **89** 1783
- [3] Smorchkova P ,Chen L ,Mates T ,Shen L ,Heikman S ,Moran B , Keller S ,DenBaars S P ,Speck J S ,Mishra U K 2001 *J. Appl. Phys.* **90** 5196
- [4] Shen L ,Heikman S ,Moran B ,Coffie R ,Zhang N Q ,Buttari D , Smorchkova I P ,Keller S ,DenBaars S P ,Mishra U K 2001 *IEEE Electron Device Lett.* **22** 457
- [5] Balmer S ,Hilton K P ,Nash K J ,Uren M J ,Wallis D J ,Lee D ,Wells A ,Missous M ,Martin T 2004 *Semicond. Sci. Technol.* **19** L65
- [6] Miyoshi M ,Egawa T ,Ishikawa H ,Asai K I ,Shibata T ,Tanaka M , Oda O 2005 *J. Appl. Phys.* **98** 063713
- [7] Kim W ,Choo D C ,Yoo K H ,Jung M H ,Cho Y H ,Lee J H ,Lee J H 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 103721
- [8] Wang X L ,Wang C M ,Hu G X ,Wang J X ,Li J P 2005 *Phys. Status Solidi C* **3** 607
- [9] Elhamri S ,Mitchel W C ,Mitchell W D ,Landis G R ,Bemey R , Saxler A 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 042112
- [10] Elhamri S ,Bemey R ,Mitchel W C ,Mitchell W D ,Roberts J C , Rajagopal P ,Gehrke T ,Piner E L ,Linthicum K J 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 7982
- [11] Kim J S ,Seiler D G ,Tseng W F 1993 *J. Appl. Phys.* **73** 8324
- [12] Saxler A ,Debray P ,Perrin R ,Elhamri S ,Mitchel W C ,Elsass C R , Smorchkova I P ,Heying B ,Haus E ,Fini P ,Ibbetson J P ,Keller S , Petroff P M ,DenBaars S P ,Mishra U K ,Speck J S 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 369
- [13] Fang F F ,Fowler A B ,Harstein A 1977 *Phys. Rev. B* **16** 4446
- [14] Elsass C R ,Smorchkova I P ,Heying B ,Haus E ,Fini P ,Maranowski K ,Ibbetson J P ,Keller S ,Petroff P M ,DenBaars S P ,Mishra U K , Speck J S 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 3528
- [15] Coleridge P T 1991 *Phys. Rev. B* **44** 3793
- [16] Coleridge P T ,Hayne M ,Zawadzki P ,Sachradja A S 1995 *Surf. Sci.* **361/362** 560
- [17] Haynes M ,Usher A ,Harris J J ,Foxon C T 1992 *Phys. Rev. B* **46** 9515
- [18] Çelik H ,Cankurtaran M ,Bayrakli A ,Tiras E ,Balkan N 1997 *Semicond. Sci. Technol.* **12** 389
- [19] Yamada S ,Ohnishi T ,Kakegawa T ,Akabori M ,Suzuki T K ,Sugiura H ,Nakamura F ,Yanguchi E ,Kawai H 2005 *Solid State Commun.* **133** 647
- [20] Qiu Z J ,Gui Y S ,Lin T ,Lu J ,Tang N ,Shen B ,Dai N ,Chu J H 2004 *Solid State Commun.* **131** 37
- [21] Link A ,Graf T ,Dimitrov R ,Ambacher O ,Stutzman M ,Smorchkova Y ,Mishra U ,Speck J 2001 *Phys. Status Solidi B* **228** 603
- [22] Brana A F ,Paniagua C ,Batallan F ,Garrido J A ,Munoz E ,Omnes F 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 932
- [23] Elhamri S ,Saxler A ,Mitchel W C ,Elsass C R ,Smorchkova I P , Heying B ,Haus E ,Fini P ,Ibbetson J P ,Keller S ,Petroff P M , DenBaars S P ,Mishra U K ,Speck J S 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 6583

The transport property of two dimensional electron gas in AlGaN/AlN/GaN structure^{*}

Zhou Zhong-Tang^{1)†} Guo Li-Wei¹⁾ Xing Zhi-Gang¹⁾ Ding Guo-Jian¹⁾ Tan Chang-Lin¹⁾

Lü Li¹⁾ Liu Jian²⁾ Liu Xin-Yu²⁾ Jia Hai-Qiang¹⁾ Chen Hong¹⁾ Zhou Jun-Ming¹⁾

1 *Beijing National Laboratory of Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*

2 *Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

(Received 13 March 2007 ; revised manuscript received 29 April 2007)

Abstract

Variable temperature Hall effect measurement was performed on the AlGaN/AlN/GaN structure with AlN interlayer grown on sapphire by metalorganic chemical vapor deposition. It was measured that the mobility and density of the two dimensional electron gas at the interface of AlN/GaN were $1.4 \times 10^4 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ and $9.3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ at 2 K, respectively. Low temperature variable magnetic field measurement manifested that only a single type of carriers contributed to the conductivity in this structure. Quantum Hall effect was observed in field as low as 3 T at 2 K. The calculated quantum scattering time of 0.23 ps is longer than that of AlGaN/GaN structure. This improvement is attributed to the AlN interlayer which effectively reduces the scattering. In addition, further analysis revealed that the small-angle scattering was important in this structure.

Keywords : AlGaN/AlN/GaN structure , two dimensional electron gas , Shubnikov-de Haas oscillation , high electron mobility transistor

PACC : 7320D

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10474126 ,10574148) and the National Basic Research Program of China (Grant No. 2002CB311900).

[†] E-mail : zzhou@mails.gucas.ac.cn