

AlGaIn/GaN 异质结载流子面密度测量的比较与分析*

倪金玉 张进成 郝 跃 杨 燕 陈海峰 高志远

(西安电子科技大学微电子学院, 宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室, 西安 710071)

(2007 年 2 月 4 日收到, 2007 年 4 月 18 日收到修改稿)

对 MOCVD 技术在蓝宝石衬底上生长的不同 Al 组分 AlGaIn/GaN 异质结进行了范德堡法 Hall 测量和电容-电压 ($C-V$) 测量, 发现 Hall 测量载流子面密度值大于 $C-V$ 测量值, 并且随着 AlGaIn 层 Al 组分的增加, 两种测量值都在增加, 同时它们的差值也在增加. 认为产生这一结果的原因有两方面. 一方面, Ni/Au 肖特基金属淀积在 AlGaIn/GaN 异质结上, 改变了 AlGaIn 势垒层的表面状态, 使得一部分二维电子气 (2DEG) 电子被抽取到空的施主表面态中, 从而减小了 AlGaIn/GaN 异质结界势阱中的 2DEG 浓度. 随着势垒层 Al 组分的增加, AlGaIn 层产生了更多的表面态, 从而使得更多的电子被抽取到了空的表面态中. 另一方面, 由于 $C-V$ 测量本身精确度受到串联电阻的影响, 使得测量电容小于实际电容, 从而低估了载流子浓度.

关键词: AlGaIn/GaN 异质结, 电容-电压测量, 载流子面密度, 串联电阻效应

PACC: 7280E, 7340L, 7360L

1. 引 言

AlGaIn/GaN 异质结场效应晶体管 (HFET) 由于其在高温、高频和大功率方面的优异特性而得到广泛的研究^[1,2]. GaN 基 HFET 的出色性能主要因为 AlGaIn/GaN 异质结界面处存在着高密度和高迁移率的二维电子气 (2DEG), 这层 2DEG 是由于异质结中大的导带不连续性以及强的极化效应产生的^[3]. 通常采用 Hall 测量和电容-电压 ($C-V$) 法测量 2DEG 载流子面密度. 对于 Hall 测量得到的 AlGaIn/GaN 异质结载流子面密度, 由于包括了样品体载流子的贡献而偏大于实际 2DEG 面密度, 其实为整个异质结材料的载流子面密度. $C-V$ 法通过测量电容随电压的变化关系, 计算载流子浓度随深度的分布, 进而积分得到载流子面密度. Lin 等人^[4]研究了 Ni 肖特基接触面积的变化对 AlGaIn/GaN 异质结 2DEG 载流子面密度的影响, 发现随着 Ni 肖特基接触面积的增加, 由 $C-V$ 法计算得到的 2DEG 载流子面密度不断减小, 当接触面积增加到一定程度, 减小量趋于常数.

另外, 在对非导电衬底上的外延层进行 $C-V$ 测量时, 必须考虑串联电阻对测量精度的影响^[5,6].

本文利用范德堡法 Hall 测量和 $C-V$ 测量研究了 AlGaIn/GaN 异质结材料的载流子面密度, 发现 Hall 测量值大于 $C-V$ 测量值, 并且随着 AlGaIn 层 Al 组分的增加, 两种测量值都在增加, 同时它们的差值也在增加, 并详细分析了其原因.

2. 实 验

本文研究的 AlGaIn/GaN 异质结材料是采用 MOCVD 技术在 c 面蓝宝石衬底上生长的, 分别以 TEGa, TMAI 和 NH_3 为 Ga 源、Al 源和 N 源, 高纯 H_2 为载气, 生长压力为 40 Torr ($1 \text{ Torr} = 1.33322 \times 10^2 \text{ Pa}$). 材料的截面图如图 1 所示, 首先在衬底上生长一层约 30 nm 厚的 GaN 成核层, 紧接着生长一层约 1250 nm 厚的未掺杂 GaN 缓冲层, 然后依次生长 6 nm 厚未掺杂 AlGaIn 层, 12 nm 厚 Si 掺杂 AlGaIn 层 (掺杂浓度约为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 和 8 nm 厚未掺杂 AlGaIn 帽层. 透射谱测量^[7]显示薄膜的总厚度约为

* 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (批准号: 513270203, 2002CB3119), 国防科技重点实验室基金 (批准号: 51432030204DZ0101, 51433040105DZ0102) 资助的课题.

1300 nm. 这些材料按照势垒层 Al 组分不同分别记为样品 1(势垒层 Al 组分为 15%)、样品 2(势垒层 Al 组分为 27%)和样品 3(势垒层 Al 组分为 35%). 室温下这些样品的范德堡法 Hall 测量载流子面密度值列于表 1 中.

8nm AlGaN
12nm Si: AlGaN
6nm AlGaN
1250nm GaN
~30nm GaN
c-Al ₂ O ₃

图 1 AlGaN/GaN 异质结截面图

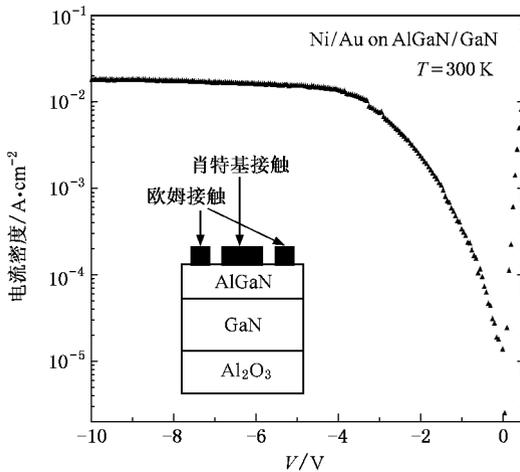


图 2 Al_{0.27}Ga_{0.73}N/GaN 肖特基二极管的 $I-V$ 特性曲线, 插图为肖特基二极管结构

表 1 不同 Al 组分的 AlGaN/GaN 异质结载流子面密度的 Hall 测量与 $C-V$ 测量结果

样品编号	势垒层 Al 组分/%	Hall 测量 $n_s/10^{12} \text{ cm}^{-2}$	$C-V$ 测量 $n_s/10^{12} \text{ cm}^{-2}$
1	15	6.4	4.6
2	27	9.1	6.4
3	35	13.0	8.7

由上述样品制作的肖特基二极管结构如图 2 中的插图所示. 圆环型的欧姆接触, 圆环的内、外直径分别为 $170 \mu\text{m}$ 和 $270 \mu\text{m}$, 面积为 $3.456 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$.

由电子束蒸发 Ti/Al/Ni/Au($200\text{\AA}/1200\text{\AA}/550\text{\AA}/450\text{\AA}$) 多层金属, 剥离, 并在 $830 \text{ }^\circ\text{C}$ 下 N_2 气氛中快速热退火 30 s 形成. 传输线测量(TLM)用来监测欧姆接触的特性, 本文研究所采用的管芯的欧姆接触比接触电阻率在 $5-17 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ 范围内, 说明肖特基接触特性良好. 圆环中间为同心的圆点型肖特基接触, 圆点的直径为 $125 \mu\text{m}$, 面积为 $1.227 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$. 由电子束蒸发 Ni/Au($200\text{\AA}/2000\text{\AA}$) 双层金属, 剥离之后形成. 肖特基 $I-V$ 特性和 $C-V$ 特性采用 Agilent B1500A 半导体器件分析仪进行测量. 样品 2 的 $I-V$ 特性如图 2 中的曲线所示, 从图中可以看到该二极管具有良好的正反向特性, 在外加偏置电压为 -10 V 时反向泄漏电流密度约为 $20 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$. 本文研究所采用的管芯的反向泄漏电流密度在 $10-40 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 范围内. $C-V$ 测量采用的交流信号振幅为 20 mV , 以满足小信号的测试条件, 测量频率为 100 kHz , 直流偏置电压从 0.5 V 扫描到 -6 V , 步长为 -0.05 V . 图 3 为样品 2 的 $C-V$ 特性曲线.

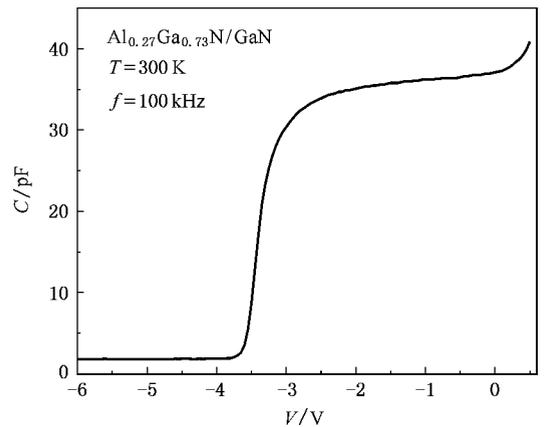


图 3 Al_{0.27}Ga_{0.73}N/GaN 肖特基二极管的 $C-V$ 特性曲线

3. 结果与讨论

根据 $C-V$ 测量数据, 通过(1)和(2)式求出半导体材料的载流子浓度随深度的分布曲线, 记为 $n-W$ 曲线.

$$n = -2 / \left(q \epsilon_0 \epsilon A^2 \frac{dC^{-2}}{dV} \right), \quad (1)$$

$$W = \frac{A \epsilon_0 \epsilon}{C}, \quad (2)$$

其中 n 为体载流子浓度, q 为电子电荷, ϵ_0 为真空介电常数, ϵ 为半导体的相对介电常数, A 为肖特基

接触的面积, C 为测量电容, V 为外加偏压, W 为耗尽层的纵向深度. 图 4 为样品 2 的 n - W 曲线, 对 n - W 曲线进行积分可得载流子面密度 n_s (见表 1). 从图中可以看出, 计算结果不能给出从表面到深度为 23.4 nm 的范围内的载流子浓度, 这是因为在 AlGa_{0.27}Ga_{0.73}N 势垒层表面制作了肖特基接触以后, AlGa_{0.27}Ga_{0.73}N 势垒层中部分电子流入金属中, 从而在 AlGa_{0.27}Ga_{0.73}N 层表面形成一定深度的耗尽层, 这部分流失的电子不能由 C - V 法测得. Lin 等人^[4]的研究认为肖特基金属淀积在 AlGa_{0.27}Ga_{0.73}N/GaN 异质结表面, 它会影响 AlGa_{0.27}Ga_{0.73}N 层的表面态, 使得一部分 2DEG 电子被抽取到空的施主表面态中, 从而减小了 AlGa_{0.27}Ga_{0.73}N 异质结界面势阱中的 2DEG 浓度, 而减小的这部分 2DEG 也不会由 C - V 法测得的.

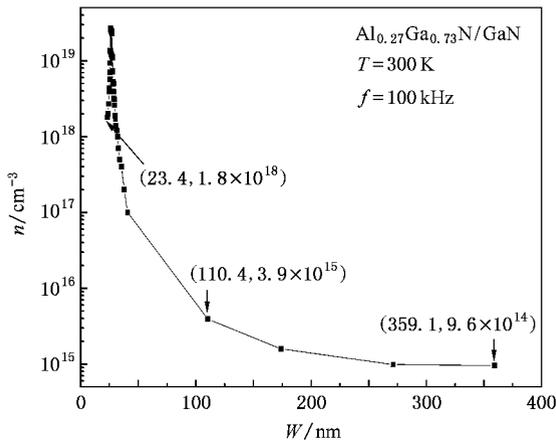


图 4 Al_{0.27}Ga_{0.73}N/GaN 异质结载流子浓度的分布

从 n - W 曲线可看出, 未掺杂 GaN 层的背景载流子浓度在 10^{14} — 10^{15} cm^{-3} 量级. 但是大多数文献认为 MOCVD 技术生长的质量较高的未掺杂 GaN 层的背景载流子浓度为 $\sim 10^{16}$ cm^{-3} , 其来源可能是氮空位或和氧杂质^[8,9]. 由 C - V 测量得到的未掺杂 GaN 层背景载流子浓度和实际值不符主要是因为 C - V 测量受到串联电阻的影响. 对 AlGa_{0.27}Ga_{0.73}N 异质结进行 C - V 测量时, 随着反向直流偏置电压的增大, 耗尽层深度逐渐增加, 串联电阻效应将逐渐变得显著. 考虑串联电阻的 C - V 测量等效电路为耗尽层电容 C 和漏电导 G 并联, 再与电阻 R_s 串联, 如图 5 所示, 其中串联电阻 R_s 主要包括未耗尽半导体电阻和欧姆接触电阻. 虽然薄膜的厚度相对于肖特基接触的直径来说很小, 约为 1%, 精确考虑串联电阻效应的影响时应当使用分布 RC 网络, 但是为了简化问题, 本文还是使用较为简单的集总元件等效电路来

分析.

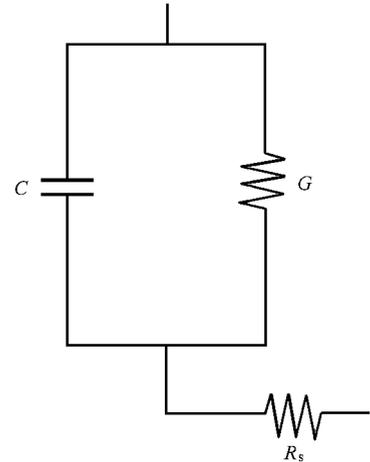


图 5 考虑串联电阻的 AlGa_{0.27}Ga_{0.73}N 肖特基二极管等效电路

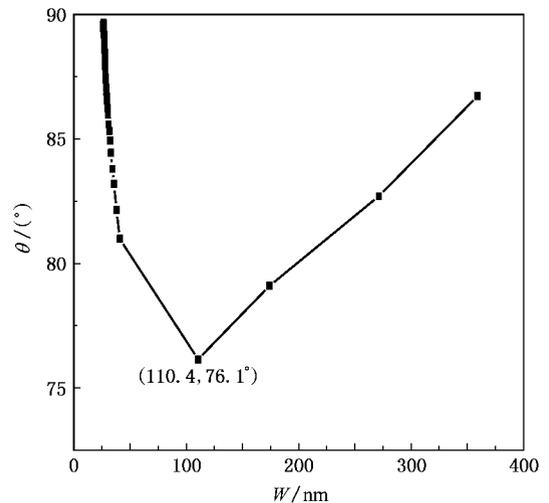


图 6 相角 θ 随深度的变化

C - V 测量中相角的测量可以监测串联电阻的影响^[5], 相角 θ 由

$$\theta = \arctan(1/\omega RC) \quad (3)$$

得到, 其中 ω 为测量频率, R 和 C 分别为 C - V 法在并联模式下测得的电导 G_p 和电容 C_p , 转换为串联模式下的电阻 R_s 和电容 C_s . 由 C - V 测量数据计算得到的各测量点的相角如图 6 所示. 在深度为 110.4 nm 的测量点处, 相角为 76.1° . 根据文献^[5], 当相角降低到 80° 以下, 就有理由认为串联电阻效应使 C - V 曲线的线形发生了扭曲, 不能正确反映实际情况. 此后的测量中, 由于高导电性的 2DEG 已经完全耗尽, 集总元件等效电路变得不适合测量和计算了. 而且串联电阻又很大, 测得到耗尽层电容又很小, 测量受

噪声的影响也逐渐增强,因此测量值变得不可信了.

值得注意的是,由于本文研究的是在非导电的蓝宝石衬底上生长的 AlGaIn/GaN 异质结材料,因此存在较高的串联电阻.串联电阻使得测量电容与实际电容不符,它们的关系为

$$C_m = \frac{C}{1 + (\omega R_s C)^2}, \quad (4)$$

其中 C_m 和 C 分别为测量电容和实际电容, ω 为测量频率, R_s 为串联电阻.由(4)式可知串联电阻效应使得测量电容比实际电容小,根据

$$C_m = A \sqrt{\frac{q\epsilon_0 \epsilon_{\text{AlGaIn}} n}{\chi(V_D - V)}} \quad (5)$$

可知,由于 $C_m \propto n^{1/2}$,因此计算出的载流子浓度 n 要比实际载流子浓度小得多.(5)式中 n 为 $C-V$ 法测得的半导体的载流子浓度, V_D 为肖特基势垒高度, V 为外加偏压.

随着反向直流偏置电压的增加,耗尽层逐渐向衬底扩展,串联电阻迅速增加,使得测量电容明显小于实际电容,计算得到的载流子浓度远小于实际值,又由(2)式可知,比实际电容小的测量电容使得计算出的耗尽层深度 w 比实际耗尽层深度要大.据此,本文对样品 2 作如下估计,假定未掺杂 GaN 层的厚度为 1250 nm,背景载流子浓度为 $(1-2) \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$,那么整个未掺杂 GaN 层对于载流子面密度的贡献为 $(1.25-2.50) \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$,而在 $C-V$ 法计算中,从深度为 110.4 nm 处到深度为 359.1 nm 处的未掺杂 GaN 层的贡献为 $3.84 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$,该值与估计值相比可以忽略,因此可以认为由于 $C-V$ 测量本身精确度受到的影响使得载流子面密度的计算中少计入了几乎整个未掺杂 GaN 层背景载流子对于测量结果的贡献,该值约为 $(1.25-2.50) \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$.把此估计值作为 Hall 测量值与 $C-V$ 测量值的差值的一部分是合理的.

通过表 1 比较不同 Al 组分的 AlGaIn/GaN 异质结载流子面密度的 Hall 测量与 $C-V$ 测量结果可知,随着 AlGaIn 层 Al 组分的增加,两种测量值都在增

加,且同一 Al 组分材料的 Hall 测量值大于 $C-V$ 测量值.另外,Al 组分从 15% 增加到 27%,再增加到 35%,两种测量方法的差值从 $1.8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 增加到 $2.7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$,再增加到 $4.3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$.这是因为随着势垒层 Al 组分的增加,表面原子密度增加,产生了更多的悬挂键,并且 AlGaIn 和 GaN 之间的晶格失配增大,也使得 AlGaIn 层产生了更多的表面态,从而有更多的 2DEG 电子以及 AlGaIn 势垒层的电子被抽取到了空的表面态中.

4. 结 论

在蓝宝石衬底上生长的 AlGaIn/GaN 异质结的 Hall 测量载流子面密度值大于 $C-V$ 测量值.这是由于 1) Ni/Au 肖特基金属淀积在 AlGaIn/GaN 异质结上,改变了 AlGaIn 势垒层的表面状态,使得一部分 2DEG 电子被抽取到空的施主表面态中,从而减小了 AlGaIn/GaN 异质结界面势阱中的 2DEG 浓度; 2) 随着施加在肖特基二极管上的反向直流偏置电压的增加,耗尽层逐渐向衬底扩展,串联电阻迅速增加, $C-V$ 测量结果受串联电阻的影响逐渐增加,使我们低估了耗尽层电容,从而低估了载流子浓度, $C-V$ 测量中少计入的这部分载流子主要是未掺杂 GaN 层的背景载流子.通过相角的测量进一步证实了串联电阻的影响.对于势垒层 Al 组分为 27% 的 AlGaIn/GaN 异质结,根据大多数文献所认可的背景载流子浓度合理地估算出少计入的部分约为 $(1.25-2.50) \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$.由 Hall 测量得到载流子面密度值大于 $C-V$ 测量值的事实对于 AlGaIn 势垒层 Al 组分分别为 15% 和 35% 的 AlGaIn/GaN 异质结材料也是成立的.而且 Hall 测量与 $C-V$ 测量的差值随着 Al 组分的增大而增大,这是因为随着势垒层 Al 组分的增加,表面原子密度增加,产生了更多的悬挂键,并且 AlGaIn 和 GaN 之间的晶格失配增大,也使得 AlGaIn 层产生了更多的表面态,从而有更多的电子被抽取到了空的表面态中.

- [1] Wu Y F, Keller B P, Keller S *et al* 1996 *Appl. Phys. Lett.* **69** 1438
 [2] Wu Y F, Saxler A, Moore M *et al* 2004 *IEEE Elec. Dev. Lett.* **25** 117
 [3] Ambacher O, Smart J, Shealy J R *et al* 1999 *J. Appl. Phys.* **85** 3222

- [4] Lin Z J, Lu W 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 14504
 [5] Wiley J D, Miller G L 1975 *IEEE Trans. Elec. Dev.* **22** 265
 [6] Wiley J D 1978 *IEEE Trans. Elec. Dev.* **25** 1317
 [7] Zhang J C, Hao Y, Li P X *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1243 [in Chinese] 张进城,郝跃,李培成等 2004 物理学报 **53** 1243]
 [8] Nakamura S 1991 *Jpn. J. Appl. Phys.* **30** L1705

[9] Chu R M 2004 *Master Thesis* (Hong Kong : Hong Kong University of

Science and Technology)

Comparison of measuring methods of sheet carrier density in AlGaN/GaN heterostructures ^{*}

Ni Jin-Yu Zhang Jin-Cheng Hao Yue Yang Yan Chen Hai-Feng Gao Zhi-Yuan

(*School of Microelectronics , Key Laboratory of the Ministry of Education for Wide Band-Gap Semiconductor**Materials and Devices , Xidian University , Xi ' an 710071 , China)*

(Received 4 February 2007 ; revised manuscript received 18 April 2007)

Abstract

Hall measurement with Van der Pauw method and the Capacitance-Voltage($C-V$) characteristics method are performed on AlGaN/GaN heterostructures with different Al contents grown on sapphire substrates by metalorganic chemical vapor deposition. It is found that the value of sheet carrier density obtained from Hall measurement is larger than that deduced from $C-V$ carrier density profile , and both values , as well as the difference between them increase with increasing Al content. This result is ascribed to two reasons. On the one hand , Ni/Au Schottky contact deposited on AlGaN/GaN heterostructure changes the surface states of the AlGaN barrier layer. Some electrons in the two-dimensional electron gas(2DEG) are extracted to the void surface donor states , and consequently the 2DEG sheet carrier concentration is reduced. And with the Al content increasing , the more the surface states of the AlGaN layer , the more the electrons are extracted to the void surface donor states. On the other hand , the precision of $C-V$ measurement is influenced by the series resistance , which causes underestimation of the magnitude of the depletion-layer capacitance and hence the carrier concentration.

Keywords : AlGaN/GaN heterostructure , capacitance-voltage measurement , sheet carrier density , series resistance effect

PACC : 7280E , 7340L , 7360L

^{*} Project supported by the State Key Development Program(973 Program) for Basic Research of China(Grants : No. 513270203 , 2002CB3119) , The National Defense Scientific and Technical Key Lab Fund of China(Grants : Nos. 51432030204DZ0101 and 51433040105DZ0102)