

# 高阻 GaN 薄膜电阻率测量\*

方测宝<sup>†</sup> 王晓亮 肖红领 王翠梅 冉军学 李成基 罗卫军 杨翠柏 曾一平 李晋闻

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

**摘要:** 建立了绝缘电阻大于  $10^{13} \Omega$  和温度起伏小于  $0.1^\circ\text{C}$  的高阻 GaN 薄膜电阻率装置, 并简述了其测量电阻率的原理. 研究了环境温度、湿度、漏电流、数据读取时间、测量电压、样品尺寸等因素对电阻率与迁移率的影响, 并讨论了各种因素所引起的测量误差.

**关键词:** 高阻 GaN; 电阻率; 测量

**PACC:** 0607E; 0750; 0620D

**中图分类号:** TN304.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2007)S0-0536-05

## 1 引言

GaN 基 III 族氮化物材料作为第三代宽禁带半导体材料的典型代表, 不仅可以制作发光二极管(LED)、激光器(LD)、短波长紫外探测器等光电器件, 而且在研制高温、高频、大功率微波电子器件方面也极具发展前途<sup>[1~6]</sup>. 由于 AlGaIn/GaN 异质结构击穿电压大, 极化可产生高浓度二维电子气(2DEG), 并具有很高的电子迁移率, 因此在微波功率器件应用方面引起了广泛关注. 为了减小漏电流, 提高 AlGaIn/GaN HEMT 及 GaN 基 MESFET 等器件的功率密度及其高温、高频性能, 高阻 GaN 层是十分必要的<sup>[4~6]</sup>.

高阻 GaN 薄膜, 室温下的电阻率在  $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$  以上, 其 Hall 样品的电阻值可高达  $10^{13} \Omega$ . 这就要求测量仪的输入阻抗、恒流源的输出阻抗以及测量线路的绝缘电阻都必须大于  $10^{13} \Omega$ , 对测量装置和测量仪的绝缘性能提出了较为苛刻的要求. 另外, 光照、温度和湿度对电阻率的影响也较大, 所以避光、恒温与低湿是必不可少的. 此外电阻率对静电干扰和机械振动也很敏感, 这对测量环境也有较高的要求. 样品的尺寸、电极的形状及位置, 对测量的结果也有一定的影响. 所以选取正确的测量方法, 采用可靠的测量技术, 保持良好的测量环境, 即可得到较为准确的实验数据. 针对上述问题, 进行了以下一些条件实验, 并搭建了一套半自动测量高阻 GaN 薄膜的 Hall 测量装置.

## 2 测量原理

采用最常用的 Van der Pauw 法<sup>[7,8]</sup>. 样品为解理的正方形的薄片, 厚度为  $t$ . 在 4 个角上或棱上作上 In 欧姆接触, 如图 1 所示.

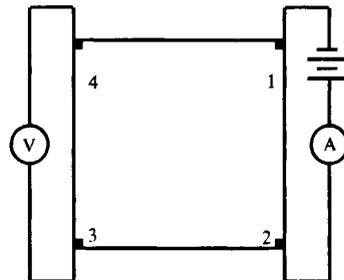


图 1 Van der Pauw 法测量电阻率

Fig. 1 Measurement of resistivity by Van der Pauw method

电阻  $R_{12,34}$  定义为:  $R_{12,34} = V_{34} / I_{12}$ , 其中  $I_{12}$  为从 1 流入, 从 2 流出的电流,  $V_{34}$  为 3, 4 两点之间的电压. 其他三个  $R_{23,41}$ ,  $R_{34,12}$ ,  $R_{41,23}$  的定义, 也是类似. 则其电阻率为:

$$\rho = (\pi t f / \ln 2) [(R_{12,34} + R_{23,41}) / 2] = 2.266 t (V_{34} / I_{12} + V_{41} / I_{23}) f \quad (1)$$

这里  $f$  为电阻比  $R_r = R_{12,34} / R_{23,41}$  的函数, 称为几何因子, 它与电极的不对称有关.

$$(R_r - 1) / (R_r + 1) = f / \ln(2) \operatorname{arccosh} \{ \exp[\ln(2) / f] \} / 2 \quad (2)$$

\* 中国科学院知识创新工程(批准号: KGCX2-SW-107-1), 国家自然科学基金(批准号: 60606002)和国家重点基础研究发展规划(批准号: 2002CB311903, 2006CB604905, 513270605)资助项目

<sup>†</sup> 通信作者. Email: cbfang@semi.ac.cn

2006-12-26 收到

因为用这个公式计算  $f$  因子十分繁琐,所以采用了一个简便的经验公式:

$$f = 1 - 0.3644R_2^2 - 0.09237R_4^4 \quad (3)$$

当  $f > 0.5$  时,公式(2)和(3)的结果十分接近,甚至前四位都是相同的.所以在我们的 Hall 测量中,也采用了这个经验公式.在比较规则的样品中, $f$  因子很接近 1,Keithley 公司在 Keithley-7065 中只作了  $f$  因子计算,并没有作  $f$  因子修正.

如果采用恒流源,并设定其电流  $I$ ,则电阻率公式可简化为:

$$\rho_1 = 2.266t(V_{34} + V_{41})f_1/I \quad (4)$$

同理,还可以定义:

$$\rho_2 = 2.266t(V_{12} + V_{23})f_1/I \quad (5)$$

但是在很高电阻率材料的 Hall 测量中,如 SI-GaN,需要用输出阻抗极高的恒流源,但该恒流源(如 Keithley-220)十分昂贵,不易得到.故采用测量各自相应的电流,利用公式(1)进行计算,也可以得到正确的结果.如果仍用单一电流,按公式(4)或者(5)计算,则会产生很大的误差.特别是用于迁移率的测量时,又多了一个电流因素,还会造成更大的误差.  $G = \rho_1/\rho_2$ ,称为均匀性因子,  $\rho = (\rho_1 + \rho_2)/2$ ,称为平均电阻.因为  $\rho_1$  与  $\rho_2$  比较相近,为节约时间,一般只测任何一组即可,即半旋转测量,但测量实践表明, $\rho$  的标准偏差比单测  $\rho_1$  或  $\rho_2$  时小一倍.

### 3 测量装置

我们采用 ASTM(美国材料测试学会)所推荐的 Van der Pauw 法的线路<sup>[8]</sup>.主要测量仪器为 Keithley 617 电流放大器.它的电压档的输入阻抗为  $10^{13}\Omega$ ,很适合于 SI-GaN 的 Hall 测量.它的电流灵敏度也非常高,可达  $fA(10^{-15}A)$ ,也很适合于作 SI-GaN 的热激电流(TSC)、光电流及热电效应谱(TEES)的测量.由于极高输出阻抗的恒流源比较昂贵,不易得到,配置高输出阻抗电流源后,还有可能使测量时间加长,所以也并非十分必要.在 SI-GaN 的 Hall 测量中,电流消耗极小(nA 量级),故用小型电池作为电源,完全能满足测量的需要.样品电流是通过串接在样品上的所谓标准电阻上的电压附后来测量的,即用一个电压表就可以完成样品电流、电导电压及 Hall 电压的测量,标准电阻的范围从  $1\sim 100M\Omega$ ,可满足低阻、中阻及高阻样品的测量.

样品室是用紫铜波导管作为长方形腔体( $38mm \times 110mm \times 19mm$ ).在扁平的两面上,紧跟上薄膜型加热器,侧面紧贴上铂电阻温度计.温度控制器为 XMT 型智能数显控制仪.由于样品室有良好的热导,且与加热器及传感器之间有良好的热接触,控制精度优于  $0.5^\circ C$ .样品室的另一侧面,安置

一个中空的热沉,用流水或液氮蒸汽冷却样品室.样品室可以保持在真空环境中,以便在夏天高湿环境下工作.在真空环境下工作时,当样品架置入样品室后,其温度变化如图 2 所示.即达到热平衡的时间约 10min.

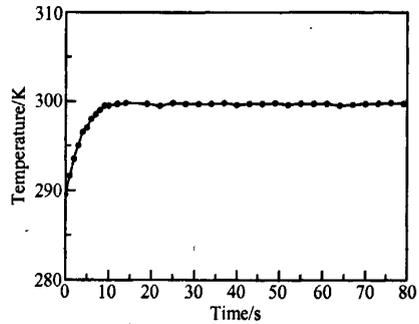


图 2 样品室样品的温度上升与平恒过程

Fig.2 Process of temperature increasing and equilibrium

### 4 样品制备

在半绝缘 GaN 的测量中,一般都采用烧结 In 电极的方法来制作欧姆接触.In 电极的烧结可以在真空中,也可以在氮气保护下还原气氛中进行烧结.图 3 是自制的管式烧结炉装置的照片.烧结管(石英

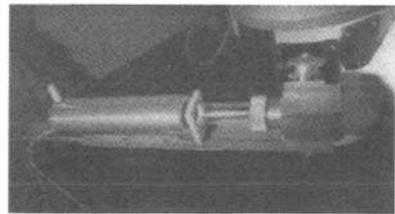


图 3 安装在真空系统上的合金炉的照片

Fig.3 Annealed furnace in vacuum environment

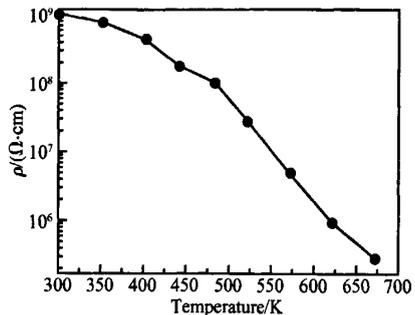


图 4 温度与电阻率的关系曲线

Fig.4 Relation of temperature and resistivity

管)一端封死,另一端用 O 形环径向密封形式,经过一个 T 形法兰结构,连通到真空系统上. 烧结炉也是一端密封,另一端开口. 长 23cm,恒温区长约 10cm. 它放置在一个导轨上,以便套在烧结管上或脱离烧结管. 该烧结在热稳定时的加热约 100W,用 XCT-101 温度控制器控制温度,精度为  $\pm 2^\circ$ . 它除了用作烧结外,还可以用作高阻材料在高温段的电阻率的变温测量.

## 5 影响高阻 GaN 薄膜电阻率和迁移率测量准确度的若干因素及改善措施

根据 Keithley 公司的 7065 自动 Hall 测量系统所给的测量精度与样品电阻的关系,当样品的方块电阻为  $2 \times 10^{13} \Omega$  时,则电阻率的测量精度为 0.4%. 如果只考虑到 Keithley 617 的测量精度时,它是不难达到的. 但考虑高阻 GaN 具体情况时,问题就复杂得多,比如  $0.1^\circ\text{C}$  的温度起伏就会引起 1% 的误差. 下面分析我们在实验中所碰到的一些问题及解决方法.

Keithley 617 为 4 位半的数字多用表,如果采用灵敏挡将有效数字读到 4 位或 4 位半,则测量误差为万分之几或千分之一,如果将有效数字只读到两位,则误差可达 1%~10%,所以测量时,尽可能用灵敏度挡.

因测量装置有一定的分布电容  $C$  (该测量控制器的分布电容约为 300pF),而典型的高阻 GaN 的电阻高达  $10^{12} \sim 10^{13} \Omega$ ,所以测量过程中的 RC 时间常数是很可观的. 一般测量时要求,测量时间至少为 RC 时间常数的 5 倍. 为了达到小于千分之一的误差,则测量时间应为 RC 的 7 倍,对于典型的高阻 GaN 样品,在 300K 下测量时,电导与电压与 Hall 电压的测量时间应大于 15s. 而在 290K 下测量时,则应大于 30s. 此时的读数误差可以小于 0.1%.

在高阻 GaN 的电阻率与迁移率测量中,样品电压一般设置为 9V,样品的电阻一般为  $3 \times 10^{12} \Omega$  左右,则样品的耗散功率为  $W = V^2/R = 81/3 \times 10^{12} = 2.7 \times 10^{-2} =$  毫瓦. 它所引起的温升  $\Delta T = (W/VM)gC = [W/(Ldh)]gC$ ,式中  $L, d, h$  分别为样品的长、宽、高,  $g$  为比重,  $C$  为比热. 设典型样品的  $L, d, h$  为  $0.7 \times 0.7 \times 5 \times 10^{-4} \text{cm}^3$ ,此时  $g$  和  $C$  分别为  $5.307 \text{g/cm}^3$  和  $22.9 \text{J}/(\text{C} \cdot \text{g})$ ,则温升  $\Delta T = [27 \times 10^{-12}/(0.7 \times 0.7 \times 5 \times 10^{-4})] \times 5.307 \times 22.9 = 6 \times 10^{-11} \text{C/s}$ ,即使在真空绝热的情况下,一个小时的温升也不过  $2 \times 10^{-7} \text{C}$ ,将测量电压再增加 10 倍,温升变化一样很小,完全可以忽略不计. 电阻率的温度系数如表 1 所示.

表 1 电阻率的温度系数

Table 1 Temperature coefficient of resistivity

温度范围/ $^\circ\text{C}$	15~20	20~25	25~30	30~35
温度系数/%	12	11	10	9

迁移率的温度系数在  $15 \sim 35^\circ\text{C}$  的范围内,约为  $0.37\%/^\circ\text{C}$ ,它远小于电阻率的温度系数. 为了使室温下的电阻均匀性的测量精度达到 1%,样品的温度需控制在  $0.1^\circ\text{C}$  以内. 如果不用控温,而能给出测量时的实际温度,经过修正,原则上也能达到消除温度的影响作用.

高湿环境可能使样品表面吸附水分产生漏电,从而影响测量的准确性. 表 2 给出了文献[9]的测量结果.

表 2 湿度对电阻率的影响

Table 2 Impact of humidity on resistivity

温度/K	湿度/%	环境	电阻率/ $(\Omega \cdot \text{cm})$
300	80	真空	$8.282 \times 10^8$
300	80	大气	$6.760 \times 10^7$
300	80	真空	$8.277 \times 10^8$

可见,较高的湿度不仅对样品的电阻率值有着极大的影响,而且对测量电路所用元件的绝缘性也有着很大的影响,甚至达到数据不稳而不能测量的程度.

本测量装置的漏电阻是在样品开路的情况下测量的. 在测量时,它是和样品并联的,对样品电流起分流作用,从而影响准确测量. 设样品的实际电阻为  $R_s$ ,系统的漏电阻为  $R_l$ ,则测量所得电阻:  $R = R_l R_s / (R_s + R_l)$ ,本系统中,所测得的漏电阻为  $20000 \text{G}\Omega$ ,设样品的电阻为  $2000 \text{G}\Omega$ ,则:  $R = 1818 \text{G}\Omega$

测量误差为:  $1 - 1818/2000 = 9.1\%$ ,如果样品电阻很高,而漏电阻又不够高的话,则需进行漏电流修正.

在 Hall 测量中,为防止少数载流子的注入或减小耗散功率,一般采用较低的电压. Keithley 7065 认为,高阻测量时,电压不应超过 5V,但实际测量表明,测量电压即使加到 45V,其电阻率与迁移率仍基本不变. 所以在高阻材料的测量时,为了提高测量的灵敏度,可适当采用较高电压.

我们对样品的尺寸效应作过一些尝试性试验,还不能作最后的结论. 开始,样品约为  $10 \text{mm} \times 10 \text{mm}$  方形片,在 4 个棱上作 In 欧姆接触,进行 Hall 测量,然后每次去掉 2mm,成为  $8 \text{mm} \times 8 \text{mm}$ ,  $6 \text{mm} \times 6 \text{mm}$ ,  $4 \text{mm} \times 4 \text{mm}$ .

Van der Pauw 法表明,电极尺寸越小,测量结果越接近真值. 但电极越小,则扩展电阻就会越大,也就会使得接触电阻增加,对称性变差,因此  $f$  因子

也变差,影响测量的准确性.但电极变大,则对电阻率、迁移率测量的影响也变大.电极的位置对 Hall 测量的影响也很大,如果将电极做在样品的周界上,无论是做在 4 个边上还是做在 4 个角上,其结果都应该是一样的.如果电极的位置距离边或角有一定的距离,则电阻率与迁移率将会有一定的降低.有人从理论上估计过这种影响<sup>[7,8]</sup>.

磁场强度是采用指针式 CT5 型高斯计校准的,仪表为一级表头,读数精度约为 0.5%,所以磁场强度的测量误差较大.样品与磁场的垂直程度也会引起通过样品有效磁场强度,如果样品偏离 5°,则磁场强度要减小 $[1 - \sin(90 - 5)] = 0.0038$ ,约为 0.4%.另外,磁场的轴向与径向的均匀,也会引起一定的误差,需要先进行修正.

另外,欧姆接触如果做得不好,相当于两个背靠背的肖特基二极管,对电阻率的测量存在影响,判断欧姆接触是否做好,一般可采用这些方法检查:电位分布法(在样品上做很多接触点,看电阻是否随距离而变化),光照法(通过光照降低样品的阻值来判断接触是否合格), $I-V$ 特性法(通过电流-电压关系的线性来判断接触是否合格),我们的实验中一般采用  $I-V$  特性法来判断接触是否为欧姆接触.金属 In 的功函数为 3.8eV, GaN 的电子亲和势为 4.1eV,金属 In 的费米能级高于 GaN 的导带底,理论上我们认为 In 与 GaN 材料的接触为欧姆接触.

图 4 为一个高阻 GaN 外延膜的电阻率与温度的关系,从图中可以看出,在室温下,外延膜的电阻率超过  $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ ; 250°C 时超过  $10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ ; 400°C 时超过  $10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ ,完全符合制作高温、高频、大功率微电子器件的要求.

## 6 结论

简要介绍了绝缘电阻大于  $10^{13} \Omega$  和温度起伏小

于 0.1°C 的高阻 GaN 薄膜 Hall 测量装置,并简述了其测量电阻率的原理.研究了环境温度、湿度、漏电流、数据读取时间、测量电压、样品尺寸等因素对电阻率与迁移率的影响,并讨论了各种因素所引起的测量误差.

## 参考文献

- [1] Tompson R, Prunty T, Kaper V, et al. Performance of the AlGaIn HEMT structure with a gate extension. *IEEE Trans Electron Devices*, 2004, 51(2): 292
- [2] Wang Xiaoliang, Wang Cuimei, Hu Guoxin, et al. RF-MBE grown AlGaIn/GaN HEMT structure with high Al content. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(6): 1116
- [3] Wang Xiaoliang, Liu Xinyu, Hu Guoxin, et al. X-band GaN power HEMTs with power density of 2.23W/mm grown on sapphire by MOCVD. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(10): 1865
- [4] Wang X L, Wang C M, Hu G X, et al. Improved DC and RF performance of AlGaIn/GaN HEMTs grown by MOCVD on sapphire substrates. *Solid-State Electron*, 2005, 49: 1387
- [5] Wang Xiaoliang, Hu Guoxin, Wang Junxi, et al. Characteristics of an AlGaIn/GaN HEMT grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, 25(2): 121
- [6] Fang Cebao, Wang Xiaoliang, Wang Junxi, et al. Deep levels in high resistivity GaN epilayers grown by MOCVD. *Phys Status Solidi C*, 2006, 3(3): 585
- [7] Analysis Center of Physics and Chemistry, Institute of semiconductors, Chinese Academy of Sciences. *Detection and analysis of semiconductors*. Beijing: Science Press, 1984: 1 (in Chinese) [中国科学院半导体研究所理化分析中心实验室. 半导体的检测与分析. 北京: 科学出版社, 1984: 1]
- [8] Schroder D K. *Semiconductor material and device characterization*. New York: John Wiley & Sons, 1990: 1
- [9] Li Chengji. Hall measurement of semi-insulating GaAs (internal document). Beijing: Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, 2002: 1 (in Chinese) [李成基. 半绝缘砷化镓的霍尔测量(内部资料). 北京: 中国科学院半导体研究所, 2002: 1]

## Resistivity Measurement of High-Resistivity GaN Film\*

Fang Cebao<sup>†</sup>, Wang Xiaoliang, Xiao Hongling, Wang Cuimei, Ran Junxue, Li Chengji,  
Luo Weijun, Yang Cuibai, Zeng Yiping, and Li Jinmin

(*Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

**Abstract:** We establish an equipment of measuring resistivity of high-resistivity GaN film for insulated-resistance more than  $10^{13} \Omega$  and temperature fluctuation less than  $0.1^\circ\text{C}$ , and state briefly measurement principle of resistivity. We also investigate the influence of environmental temperature, humidity, leakage current, collected-time of data, measured-voltage, and size of sample on resistivity, respectively, and discuss measurement error induced by the factors.

**Key words:** high-resistivity GaN; resistivity; measurement

**PACC:** 0607E; 0750; 0620D

**Article ID:** 0253-4177(2007)S0-0536-05

---

\* Project supported by the Knowledge Innovation Engineering of Chinese Academy of Sciences (No. KGCX2-SW-107-1), the National Natural Science Foundation of China (No. 60606002), and the State Key Development Program for Basic Research of China (Nos. 2002CB311903, 2006CB604905, 513270605)

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: cbfang@semi.ac.cn

Received 26 December 2006