

p 型 GaN 欧姆接触的比接触电阻率测量 *

薛 松 韩彦军 吴 震 罗 毅

(清华大学电子工程系 集成光电子国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 采用多种传输线模型方法, 测量了 p 型 GaN 上的欧姆接触的比接触电阻率. 通过比较和分析不同测量方法所得的结果之间的差异, 得出了一个准确、可靠测量 p 型 GaN 上的欧姆接触的比接触电阻率的方法——圆点传输线模型方法. 利用该方法优化了 p 型 GaN 上欧姆接触的退火温度, 在氧气气氛中 650 °C 退火后获得了最优的欧姆接触, 其比接触电阻率为 $5.12 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$.

关键词: p 型氮化镓; 比接触电阻率; 传输线模型; 圆形传输线模型

PACC: 6855; 7280; 7830

中图分类号: TN312.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2005)05-0965-05

1 引言

GaN 基材料具有优异的化学和物理特性, 在光电子学和微电子学领域有着不可估量的应用前景^[1~3]. 然而 GaN 基器件的制备存在许多困难, 其中 p-GaN 上的欧姆接触的制作就是其中的难点之一. 近年来, 国内外许多研究小组通过多种方法从多方面进行了研究, 改善了 p 型 GaN 上的欧姆接触. Ishikawa 等人发现选取功函数大的金属作电极可以降低接触的肖特基势垒高度, 从而降低欧姆接触的比接触电阻率^[4]; 薛松等人通过处理 p 型 GaN 表面, 去除其表面上的氧化层, 并且改变了表面物理化学状态, 因而改善了 p 型 GaN 上的欧姆接触^[5]; Ho 等人改变 p 型电极的退火气氛, 把它置于氧气中退火获得了比接触电阻率为 $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 量级的 p-GaN 上的欧姆接触^[6].

然而对于 p 型 GaN 上的欧姆接触的比接触电阻率的测量, 不同小组之间的测量方法存在很大差异. 比接触电阻率 (SCR, specific contact resistance) 是定量反映电极金属和半导体材料之间欧姆接触质量的重要参数. 目前, 存在基于不同模型的多种测量

比接触电阻率的方法, 其测量结果有较大差别. 当比接触电阻率很小时, 即使采用同一种方法, 不同作者的结果也会有数倍之差. 因此, 选取相对较准确的, 且具有可重复性的比接触电阻率的测量方法, 对于正确评价欧姆接触的好坏至关重要.

比接触电阻率的测量主要分为两大类: 一类是体材料上的比接触电阻率的测量, 包括有“四探针法”、“拟和法”等; 另一类是薄膜材料上的比接触电阻率的测量, 包括多种“传输线模型方法 (TLM, transmission line model)”和“界面接触电阻直接测定法”^[7]. 本论文的研究对象是厚度为 $1\mu\text{m}$ 的 p-GaN 材料, 属于薄膜型半导体材料. 因此, 我们采用了矩形、圆环和圆点三种传输线模型方法对 p 型 GaN 上欧姆接触的比欧姆接触率进行了测量, 并且讨论了这几种 TLM 测量方法的优缺点.

2 实验

实验样品为薄膜型的 p 型 GaN 材料, 由低压金属有机化合物气相外延 (LP-MOVPE) 技术生长获得. 其生长过程为: 在 (0001) 晶向的蓝宝石衬底上依次生长了 25nm GaN 缓冲层, $1\mu\text{m}$ 非掺杂 GaN, 以

* 国家重点基础研究发展规划 (批准号: TG2000036601), 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2001AA312190, 2002AA31119Z) 和国家自然科学基金 (批准号: 60244001) 资助项目

薛 松 男, 1976 年出生, 博士研究生, 从事 GaN 光电子器件工艺的研究.

罗 毅 男, 1960 年出生, 教授, 从事半导体材料与器件的研究.

2004-05-28 收到, 2004-10-26 定稿

及 $1\mu\text{m}$ p-GaN. 其中, p 型 GaN 层的空穴浓度和迁移率通过霍尔方法测得, 分别为 $3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 和 $3\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$.

采用的三种欧姆接触的比接触电阻率测量方法, 分别为矩形传输线模型方法、圆环传输线模型方法和圆点传输线模型方法^[7~9], 其中圆环传输线模型方法和圆点传输线模型方法又统称为圆形传输线方法 (CTLM). 这三种传输线模型方法中采用的欧姆接触图形如图 1 所示.

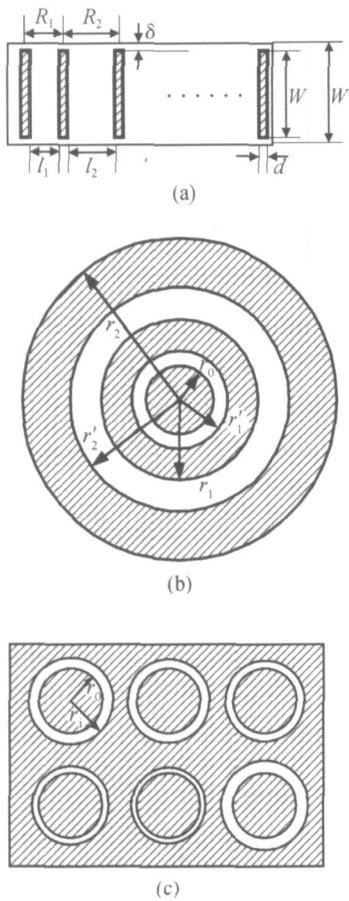


图 1 三种传输线模型方法所采用的欧姆接触图形: (a) 矩形传输线模型, $W = 200\mu\text{m}$, $W = 210\mu\text{m}$, 欧姆接触间隔依次为: 8, 11, 14, 17, 20, 23, 26, 29, 34, 39, 44, $49\mu\text{m}$; (b) 圆环传输线模型, $r_0 = 77\mu\text{m}$, $r_1 = 198\mu\text{m}$, $r_1 = 102\mu\text{m}$, $r_2 = 318\mu\text{m}$, $r_2 = 252\mu\text{m}$; (c) 圆点传输线模型 $r_0 = 77\mu\text{m}$, $r_1 = 86, 91, 96, 101, 106, 111\mu\text{m}$

Fig. 1 Patterns of ohmic contacts used in transmission line model method (a) Rectangular TLM, $W = 200\mu\text{m}$, $W = 210\mu\text{m}$; spacing = 8, 11, 14, 17, 20, 23, 26, 29, 34, 39, 44, $49\mu\text{m}$; (b) Ring-CTLM, $r_0 = 77\mu\text{m}$, $r_1 = 198\mu\text{m}$, $r_1 = 102\mu\text{m}$, $r_2 = 318\mu\text{m}$, $r_2 = 252\mu\text{m}$; (c) Dot-CTLM, $r_0 = 77\mu\text{m}$, $r_1 = 86, 91, 96, 101, 106, 111\mu\text{m}$

实验过程中欧姆接触的制作采用相同的工艺条件, 具体过程如下: 首先, 在 p 型 GaN 外延片上制作光刻胶掩膜图形; 然后采用热蒸发方法, 在外延片上依次蒸镀 Ni/Au 双层金属薄层; 最后采用剥离技术, 剥离掉外延片上的光刻胶掩膜, 得到了上述各种电极图形, 然后在 O_2 气氛中 750°C 退火形成欧姆接触.

3 结果与讨论

3.1 测量结果

3.1.1 矩形传输线模型方法

矩形传输线模型方法的测量结果如图 2 所示. 图中曲线表示不同欧姆接触间的总电阻与其间隔的关系. 在未考虑实际欧姆接触尺寸与设计值的差别情况下得到的比接触电阻率为 $5.7 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$; 准确测量实际欧姆接触尺寸后得到的测量结果为 $1.35 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}^2$. 可见修正前后相对误差为 60%.

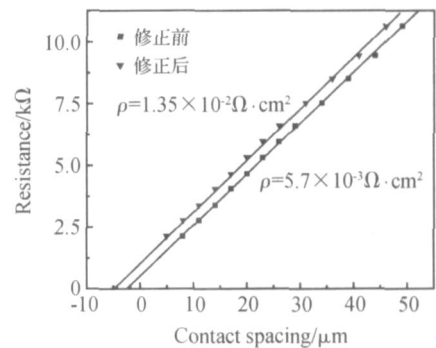


图 2 矩形传输线模型方法的测量结果

Fig. 2 Result of rectangular transmission line model method

3.1.2 圆环传输线模型方法

表 1 列举了 8 组圆环传输线模型方法测量结果, 修正前为未考虑实际欧姆接触尺寸与设计值的差别情况下的测量结果, 修正后为准确测量实际欧姆接触尺寸后得到的测量结果. 修正前后, 比接触电阻率平均来说相对误差约为 40%.

表 1 圆环传输线模型方法的测量结果

Table 1 Measurement results of ring CTLM

测量次数	R_1 /k	R_2 /k	R_3 /k	R_e /	修正前 /($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	修正后 /($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
1	2.74	2.27	4.96	25	/	3.52×10^{-2}
2	2.8	2.26	5.01	25	2.96×10^{-2}	4.23×10^{-2}

测量次数	R_1 /k	R_2 /k	R_3 /k	R_e /	修正前 /($\cdot\text{cm}^2$)	修正后 /($\cdot\text{cm}^2$)
3	2.79	2.26	5.01	20	2.61×10^{-2}	3.84×10^{-2}
4	2.94	2.38	5.26	30	3.19×10^{-2}	4.58×10^{-2}
5	2.74	2.23	4.94	15	2.20×10^{-2}	3.36×10^{-2}
6	2.8	2.32	5.1	10	1.84×10^{-2}	3.09×10^{-2}
7	2.77	2.26	5.03	0	/	0
8	2.89	2.39	5.26	10	1.57×10^{-2}	2.75×10^{-2}

3.1.3 圆点传输线模型方法

圆点传输线模型方法的测量结果如图 3 所示. 曲线表示了不同欧姆接触间总电阻 R_i 与 $\ln(r_i/r_0)$ 之间的关系. 未考虑实际欧姆接触尺寸与设计值的差别时得到的比接触电阻率为 $2.73 \times 10^{-3} \text{ } \cdot \text{cm}^2$; 准确测量实际欧姆接触尺寸后得到的测量结果为 $2.13 \times 10^{-2} \text{ } \cdot \text{cm}^2$. 修正前后两者相对误差约 20%.

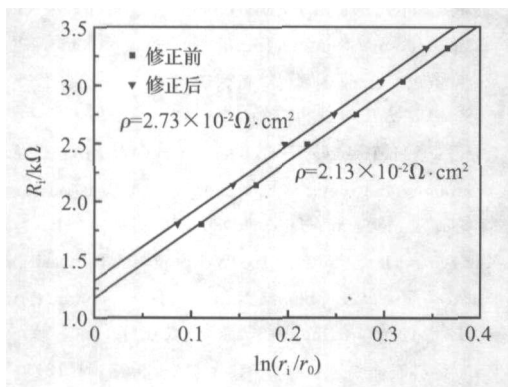


图 3 圆点传输线模型方法的测量结果

Fig.3 Result of dot circular transmission line model method

3.2 讨论

由矩形传输线模型方法(图 2)和圆点传输线模型方法(图 3)测量得到的 p 型 GaN 的方块电阻都约等于 4×10^4 , 将方块电阻乘以 p 型 GaN 层的厚度, 得到 p 型 GaN 的体电阻率为 $4 \text{ } \cdot \text{cm}$. 这与我们采用霍尔方法测得的体电阻为 $7 \text{ } \cdot \text{cm}$ 在数量级上相吻合, 说明测量结果基本可信. 但是这三种测量方法得出的比接触电阻率有所差异, 特别是矩形传输线方法与圆环传输线和圆点传输线方法的测量结果之间存在非常大的不同. 以下分别对它们进行讨论.

首先从工艺角度来说, 矩形传输线模型方法较为复杂, 必须进行台面刻蚀. 由于套刻精度和刻蚀工艺的限制, 台面与欧姆接触之间必须留有余量, 因

而引入寄生电阻^[7], 造成了测量误差. 即使在这个微小间隙确定的情况下, 也会因为操作人员的光刻工艺的水平以及其干法刻蚀工艺的条件不同, 产生不同的测量误差, 即“人员误差”很大. 这就影响了比接触电阻率测量的可靠性. 而圆形传输线模型, 包括圆环和圆点传输线模型, 都避免了台面的刻蚀. 这样即简化了工艺又消除了余量 的影响.

从表 1 可以看出, 由圆环传输线方法多次测得的欧姆接触的比接触电阻率差别很大. 仔细研究发现, 其误差主要来源于端电阻 R_E 的测量^[7,8]. 端电阻 R_E 比较小, 约为 10^0 量级, 它在数值上等于 $(R_1 + R_2 - R_3)/2$; 而 R_1, R_2 和 R_3 数值上约为 10^3 量级, 这是由 p-GaN 本身较大的体电阻率决定的. 然而, $R_1 + R_2$ 和 R_3 在数值上非常接近, 当两个相近的大数相减必然会引入较大的测量误差. 也就是说, R_1, R_2 和 R_3 本身的绝对测量误差达到了可以和 R_E 相比拟的地步, 因此造成了 R_E 测量值的不准确, 使得测量误差表现出很大的随机性. 从表 1 还可以看到甚至有一组数据的端电阻为 0, 这在理论上是不可能存在的情况. 由于端电阻的测量不稳定, 使得圆环传输线方法无法准确测量 p-GaN 欧姆接触的比接触电阻率.

此外我们还发现在欧姆接触制作的过程中采用的光刻胶掩膜, 会受到曝光光束的衍射和显影时过度显影的影响, 使得光刻胶掩膜比设计的尺寸缩小了 $1\mu\text{m}$, 因此欧姆接触的实际尺寸比设计值增大了 $1\mu\text{m}$, 欧姆接触间的实际间隔要比设计值小了 $2\mu\text{m}$, 导致了比接触电阻率的测量值偏小. 从图 2 可以看出对于采用矩形传输线模型方法获得的测量结果, 修正前后测量值相差竟达 2 倍多, 这是因为这 $2\mu\text{m}$ 的误差导致测量曲线会向右位移 $2\mu\text{m}$, 使得比接触电阻率的测量值大大偏小. 在曲线偏移量不变的情况下, 随着欧姆接触的比接触电阻率的进一步降低, 由欧姆接触尺寸引入的相对误差还会进一步增大, 造成测量结果越来越不准确. 而在圆点传输线模型中, 曲线的纵坐标采用的是 $\ln(r_i/r_0)$ 的形式, 它引起的曲线相对偏移量较小, 如图 3 所示, 因而有较小的误差, 修正前后比接触电阻率的相对误差约为 20%. 在圆环传输线方法中, 计算时公式中要多次引用各圆环半径 r 的值, 这里每一个 r 都有误差, 经过多次计算后, 综合起来就会产生很大的误差. 如表 1 所示, 比接触电阻率修正前后平均相差 40%. 因此在圆点传输线模型中的测量结果受欧姆接触尺寸变

动的影响相对于矩形传输线模型和圆环传输线模型要小得多。

经过修正后,这三种方法的测量结果在同一数量级上,但是圆点传输线和矩形传输线方法的测量结果仍然相差 2~3 倍。我们认为这是因为矩形传输线模型中电流在边界处有扩展效应,电流路径的实际宽度会大于欧姆接触的宽度,导致测量结果偏小,在这一点上我们的结果和其他作者的测量结果比较一致^[7]。再看圆环与圆点传输线模型,在我们的实验中圆点传输线方法重复性好,测量结果为 $2.73 \times 10^{-2} \text{ } \cdot \text{cm}^2$,而圆环传输线方法由于端电阻测量的重复性差,使得测量结果在 $(2.75 \sim 4.58) \times 10^{-2} \text{ } \cdot \text{cm}^2$ 之间,其平均值约为 $3 \times 10^{-2} \text{ } \cdot \text{cm}^2$ 。从这一结果不难看出圆环与圆点传输线方法的测量结果之间并没有太大差别。基于以上分析我们认为,圆点传输线模型方法除了具有较好的可操作性和重复性之外,也更真实的反映了实际的 p 型 GaN 欧姆接触的比接触电阻率的大小。因此,它非常适合测量 p 型 GaN 上的欧姆接触的比接触电阻率。

我们采用圆点传输线模型方法对 p 型 GaN 上欧姆接触的退火温度进行了优化。结果表明,在氧气气氛中 650 °C 退火后获得了比接触电阻率最低的欧姆接触,其大小为 $5.12 \times 10^{-4} \text{ } \cdot \text{cm}^2$,如图 4 所示。

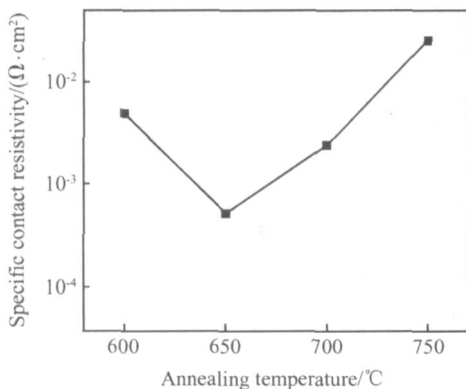


图 4 p 型 GaN 上欧姆接触的比接触电阻率与退火温度的关系

Fig. 4 SCR of ohmic contact on p-GaN as a function of annealing temperature

4 结论

本文采用矩形、圆环和圆点传输线模型方法等

三种比接触电阻率的测量方法,对 p 型 GaN 上的欧姆接触进行了测量。分析了三种测量方法各自存着的误差,并讨论了这三种测量方法的优缺点。结果表明,圆点传输线模型方法具有较好的可操作性、准确性和重复性,非常适合评价 p 型 GaN 上的欧姆接触特性。我们利用了圆点传输线模型方法优化了 p 型 GaN 上欧姆接触的退火温度,在氧气气氛中 650 °C 退火后获得了最优的欧姆接触,其比接触电阻率为 $5.12 \times 10^{-4} \text{ } \cdot \text{cm}^2$ 。

参考文献

- [1] Nakamura S, Pearton S, Fasol G. The blue laser diode: The complete story second edition. Berlin: Springer, 2000: 7
- [2] Morkoc H. Nitride semiconductors and device. Berlin: Springer, 1999: XV
- [3] Liang Chunguang, Zhang Ji. GaN —dawn of 3rd-generation semiconductors. Chinese Journal of Semiconductors, 1999, 20(2): 89 (in Chinese) [梁春广, 张冀. GaN ——第三代半导体的曙光. 半导体学报, 1999, 20(2): 89]
- [4] Ishikawa H, Kobayashi S, Koide Y, et al. Effects of surface treatments and metal work functions on electrical properties at p-GaN/metal interfaces. J Appl Phys, 1997, 81(3): 1315
- [5] Xue Song, Han Yanjun, Guo Wenping, et al. Investigation on surface of p-GaN. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(12): 1280 (in Chinese) [薛松, 韩彦军, 郭文平, 等. p 型 GaN 材料表面物理特性. 半导体学报, 2003, 24(12): 1280]
- [6] Ho J K, Jong C S, Chiu C C, et al. Low-resistance ohmic contacts to p-type GaN achieved by the oxidation of Ni/ Au films. J Appl Phys, 1999, 86(8): 4491
- [7] Wu Dingfen, Yan Benda. Principle, measurement and processing of ohmic contacts on metal-semiconductor interface. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1989: 22 (in Chinese) [吴鼎芬, 颜本达. 金属-半导体界面欧姆接触的原理、测试与工艺. 上海: 上海交通大学出版社, 1989: 22]
- [8] Reeves G K. Specific contact resistance using a circular transmission line model. Solid State Electron, 1980, 23: 487
- [9] Marlow G S, Das M B. The effects of contact size and non-zero metal resistance on the determination of specific contact resistance. Solid State Electron, 1982, 25: 91
- [10] Han Yanjun, Xue Song, Wu Tong, et al. Nonselective and smooth etching of GaN/ AlGaIn heterostructures by Cl₂/ Ar/ BCl₃ inductively coupled plasmas. J Vac Sci Technol A, 2004, 22(2): 407

Measurement of Specific Contact Resistivity of Ohmic Contact on p-GaN*

Xue Song, Han Yanjun, Wu Zhen, and Luo Yi

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Department of Electronics Engineering,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract : Three transmission line model methods are adopted to measure the specific contact resistivity (SCR) of the ohmic contacts on p-GaN. By comparing and analyzing the results of these experiments, it is concluded that the dot circular transmission line model (dot-CTLTM) is the most suitable method to measure the SCR of the ohmic contact on p-GaN. Based on the dot-CTLTM, the annealing temperature of ohmic contact on p-GaN is optimized, and the best result with SCR of $5.12 \times 10^{-4} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$ is achieved after annealing at 650 °C in O₂ atmosphere.

Key words : p-GaN; SCR; TLM; CTLTM

PACC : 6855; 7280; 7830

Article ID : 0253-4177(2005)05-0965-05

* Project supported by State Key Development Program for Basic Research of China (No. TG2000036601), National High Technology Research and Development Program of China (Nos. 2001AA312190, 2002AA31119Z), and National Natural Science Foundation of China (No. 60244001)

Xue Song male, was born in 1976, PhD candidate. He is engaged in research on GaN related devices.

Luo Yi male, was born in 1960, professor. He is engaged in research on semiconductor materials and devices.

Received 28 May 2004, revised manuscript received 26 October 2004

© 2005 Chinese Institute of Electronics