

## GaN HEMT 欧姆接触模式对电学特性的影响\*

朱彦旭 曹伟伟<sup>†</sup> 徐晨 邓叶 邹德恕

(北京工业大学, 省部共建光电子重点实验室, 北京 100124)

(2014年1月16日收到; 2014年2月27日收到修改稿)

本文制备了 AlGaN/GaN HEMT 器件中常规结构与带有纵向接触孔结构的两种接触电极, 研究了该两种源欧姆接触模式对器件电学特性的影响. 在相同条件下进行快速退火, 发现在 750 °C 下退火 30 s 后, 常规结构还没有形成欧姆接触, 而带有纵向欧姆接触孔的接触电极与外延片已经形成了良好的欧姆接触. 同时, 比较了 Ti/Al/Ti/Au 和 Ti/Al/Ni/Au 电极退火后表面形态, Ti/Al/Ni/Au 具有更好的表面形貌. 通过测试两种结构的 HEMT 器件后, 发现采用纵向欧姆接触孔结构器件具有更高的跨导和饱和电流, 但是也会在栅极电压为 0.5—2 V 之间产生严重的电流崩塌现象.

**关键词:** AlGaN/GaN, 高迁移率电子晶体管, 欧姆接触

**PACS:** 73.40.Kp, 73.40.Vz, 61.72.uj

**DOI:** 10.7498/aps.63.117302

## 1 引言

GaN 是第三代宽禁带半导体材料, 由于其具有大禁带宽度 (3.4 eV)、高电子饱和速率 ( $2 \times 10^7$  cm/s), 高的击穿电场 ( $1 \times 10^{10}$ — $3 \times 10^{10}$  V/cm), 较高热导率, 耐腐蚀和抗辐射性能, 在高压、高频、高温、大功率和抗辐照环境条件下具有超强的优势<sup>[1-4]</sup>, 被认为是研究短波光电子器件和高压高频大功率器件的最佳材料. GaN 基 AlGaN/GaN 高迁移率晶体管 (high electron mobility transistors, HEMT) 是功率器件中的研究热点<sup>[5]</sup>, 这是因为 AlGaN/GaN 异质结处形成高浓度、高迁移率的二维电子气 (2DEG), 同时异质结对 2DEG 具有良好的调节能力.

AlGaN/GaN 异质结的掺杂会引入杂质离子, 电离杂质散射的影响使得沟道中 2DEG 的散射增强, 在一定程度上限制了迁移率的提高. 基于此原因, 现在研究的 AlGaN/GaN HEMT 结构各层材料均为本征材料. GaN 材料的带隙较宽和非掺杂本征材料的使用使得具有低欧姆接触电阻的 HEMT

器件较难获得. 而对于大功率高频器件, 低的接触电阻往往意味着低热量的产生和高的器件可靠性, 所以欧姆接触工艺属于 HEMT 制作的关键工艺. 以往研究中主要采用 Ti/Al/阻挡层/Au<sup>[6]</sup> 或者是 Ti/Al/Ti/Al... 阻挡层/Au<sup>[7]</sup> 的多层金属结构获得较低的欧姆接触电阻, 有研究者采用在欧姆接触电极下淀积 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的方法来降低接触电阻<sup>[8]</sup>.

本文通过改变欧姆接触电极与 2DEG 直接接触的模式, 即先刻蚀纵向欧姆接触孔然后电极欧姆电极的方法, 研制出一种具有部分纵向接触的电极的 GaN HEMT 器件结构 (如图 1 (a) 所示), 得出了较好的欧姆接触特性和输出特性曲线. 在此基础上与常规结构制作的 HEMT 器件进行对比, 研究和分析了该结构对器件性能的影响.

## 2 理论与实验

对于微波晶体管而言, 电流截止频率  $f_T$  和最高振荡频率  $f_{max}$  是衡量其性能的两个重要参数. 二者分别反映该器件所能提供的最大电流放大和功率放大频率. 它们的表达式如下所示:

\* 北京市教委基金 (批准号: KM201210005004) 和国家自然科学基金 (批准号: 61107026) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: caoweimei@emails.bjut.edu.cn

$$f_T = \left\{ 2\pi \left[ \frac{L_g + \Delta L}{\nu_{sat}} + C_{gd}(R_s + R_d) + \tau_{cc} \right] \right\}^{-1}, \quad (1)$$

$$f_{max} = \frac{f_T}{2 \left( \frac{R_g + R_{ch} + R_s}{R_{ds}} + 2\pi f_T C_{gd} R_g \right)^{1/2}}, \quad (2)$$

式中,  $L_g$  为设计栅长,  $\Delta L$  为有效栅长的扩展长度,  $\nu_{sat}$  是电子饱和速度,  $C_{gd}$  是栅漏寄生电容,  $R_s$  和  $R_d$  分别是源端和漏端寄生电阻,  $\tau_{cc}$  是沟道充放电时间,  $R_{ch}$  则是整个沟道电阻,  $R_g$  是栅极寄生电阻,  $R_{ds}$  是 HEMT 的输出电阻.

从公式中我们容易知道, 为了提高  $f_T$  和  $f_{max}$ , 可以从多方面入手. 对于已经选定的外延材料而言, 电子饱和速度  $\nu_{sat}$  是一定的, 只能减小  $L_g$ ,  $\Delta L$ ,  $C_{gd}$ ,  $R_s$ ,  $R_d$  和  $\tau_{cc}$ . 由于  $C_{gd} \propto L_g$ ,  $R_s$  和  $R_d$  均受欧姆接触  $R_c$  的控制, 所以减小  $C_{gd}$ ,  $R_s$ ,  $R_d$  归结为减小  $L_g$  和  $R_c$ . 综上所述, 对于已经确定栅长  $L_g$  的 HEMT 器件, 可以通过工艺减小其接触电阻  $R_c$  的大小来提高其频率特性, 这也说明了欧姆接触对于提高 HEMT 器件性能的重要作用. 根据该原理, 实验中只设计了一种栅长, HEMT 性能主要受到欧姆接触电阻  $R_c$  的影响.

本实验采用中国科学院物理研究所提供的蓝宝石衬底外延片, 其外延结构如图 1 所示. 通过金属有机物化学气相外延 (MOCVD) 技术, 在 (0001) 面的蓝宝石衬底上依次生长掺 Fe 的高阻 GaN 和本征 GaN 共 1.7  $\mu\text{m}$ , 势垒层为 20 nm 非掺杂的  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , Al 组分为 0.22. 在 AlGaN 与 GaN 之间有 1 nm 的 AlN 插入层, 为 2DEG 提供一个散射较少的迁移通道. 霍尔效应测得其 2DEG 浓度为  $1.2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ , 迁移率达到  $1880 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ .

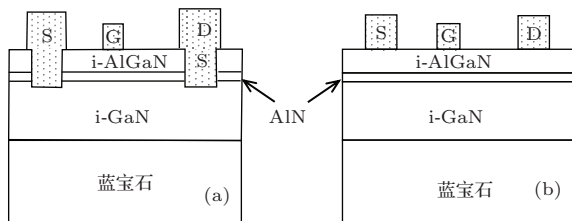


图 1 两种结构的 GaN HEMT 器件 (A 结构是具有欧姆接触孔的 HEMT; B 结构是常规接触型的 HEMT)

如图 1 所示, 我们设计了两种接触结构的 HEMT 器件. 两种结构 GaN HEMT 的工艺不同之处在于: A 结构刻蚀出 200 nm 纵向源漏接触孔. 按照外延片结构只需要刻蚀 20 nm 左右, 可是由于刻蚀太浅导致甩胶后光刻机中难以观察到对版标记, 从而增加后续光刻工艺中套版难度.

AlGaN/GaN HEMT 的工艺流程: A 结构器件 ICP 刻蚀 200 nm 纵向源漏接触孔; ICP 干法刻蚀进行有源区隔离, 为了降低电极爬坡难度通过两次套版进行 ICP 刻蚀; PECVD 淀积  $\text{SiO}_2$  保护台面并腐蚀出有源区; 选择 Ti/Al/Ni/Au (15 nm/150 nm/40 nm/50 nm) 作为源漏接触电极, 随后在高纯  $\text{N}_2$  气氛中通过快速退火炉 800  $^\circ\text{C}$ , 30 s 快速退火; 选择 Ni/Au (30 nm/300 nm) 作为栅极肖特基电极; 表面淀积  $\text{SiO}_2$  对器件进行钝化并腐蚀电极孔; 最后对器件电学性能进行测试. 图 2 是 A 结构器件的工艺流程图.

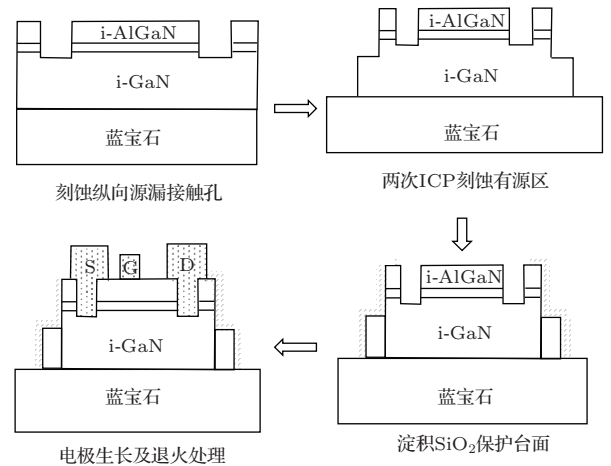


图 2 工艺流程图

### 3 结果与讨论

对于功率器件, 欧姆接触电极快速退火后的表面形貌和边缘形态对可靠性也具有较强的影响. 前期实验中采用 Ti/Al/Ti/Au 作为源漏电极, 并通过 750  $^\circ\text{C}$ , 30 s 快速退火形成欧姆接触, 该实验中采用 Ti/Al/Ni/Au 四重金属作为源漏电极. 图 3 和图 4 分别是用台阶仪测试两种不同金属配比电极退火后表面形貌情况和显微图片对比. 对比两种电极退火后表面粗糙程度发现: 采用 Ti/Al/Ni/Au 电极退火后表面粗糙程度较小, 表面比较光滑. 采用 Ti 做阻挡层时由于 Ti 对于 Al 和 Au 的扩散的阻挡作用较小, 使得 Al/Ti/Au 三重金属相互扩散, 在电极表面产生较大的粗糙度. 这也说明, 在多重金属结构中金属 Ni 的阻挡作用强于金属 Ti 的阻挡作用, 这就在较大程度上阻挡了退火时 Al 金属向外扩散和 Au 的向内扩散.

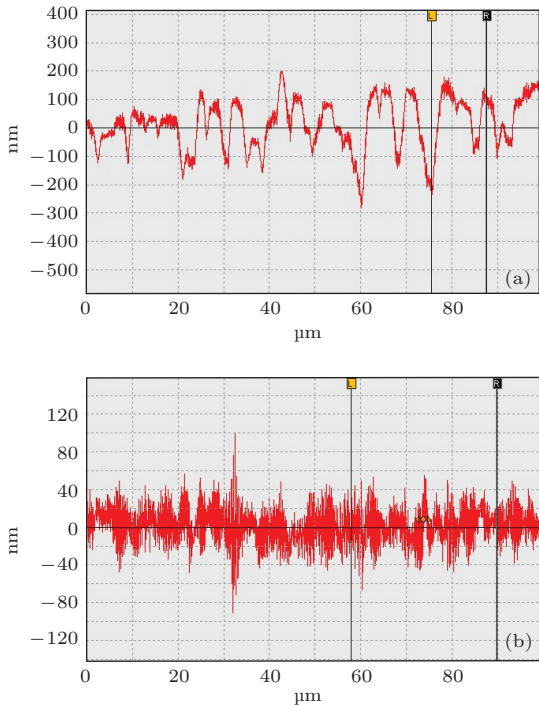


图3 Ti/Al/Ti/Au 和 Ti/Al/Ni/Au 两种源漏电极退火后表面粗糙程度对比 (a) 为 Ti/Al/Ti/Au 电极; (b) 为 Ti/Al/Ni/Au 电极

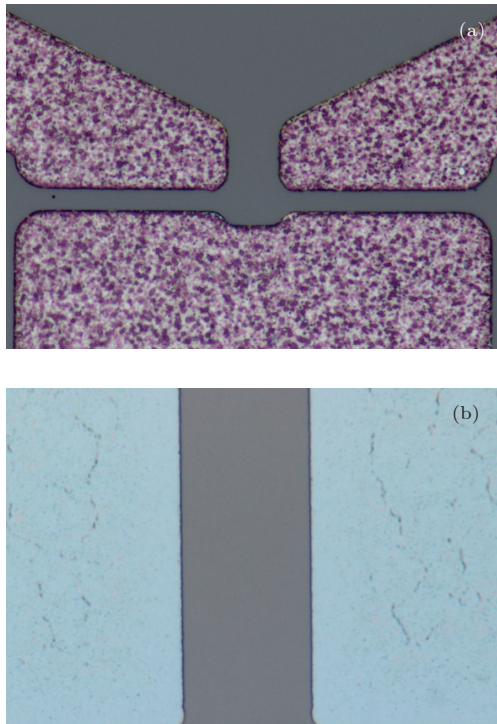


图4 Ti/Al/Ti/Au 和 Ti/Al/Ni/Au 两种欧姆电极退火后表面 1000 倍显微图片对比 (a) 为 Ti/Al/Ti/Au 电极; (b) 为 Ti/Al/Ni/Au 电极

对于 AlGaIn/GaN HEMT 欧姆接触机理主流观点<sup>[9]</sup>认为: Ti/Al/Ni/Au 与 AlGaIn 层形成欧姆

接触的过程中, Al, Ti 向内扩散与 AlGaIn 发生反应, 使得 AlGaIn 中 N 向金属层扩散, 形成大量 N 空位, 从而形成重掺杂的半导体. 当退火温度和退火时间没有达到形成欧姆接触的要求, 反应不够充分就无法形成良好的欧姆接触.

由于 ICP 刻蚀隔离有源区导致的电极爬坡难度属于较难部分, 所以本实验所设计的两次刻蚀就显示出其对于降低电极爬坡难度的优势. 同时, 由于孔内接触电极与 GaN 的热膨胀系数不同, 高温退火时两者间会产生间隙, 这就使得纵向接触孔结构失效. 而且由于接触孔的存在, 水平方向的有效接触面积又被减小, 这就对实验造成了不利影响, 甚至会得出相反结果. 我们实验所采用的两步刻蚀在理论上可以缓解这个问题, 图 5 是经过两次 ICP 刻蚀后器件的台阶状况. 在进行 ICP 刻蚀中, 我们参考了实验室之前的研究的成果 (详见文献<sup>[10]</sup>), 采用光刻胶做掩膜的方法使得刻蚀后台面不是完美的垂直角度, 而是呈现出一定的坡度, 这对于电极在台面侧壁的附着能力有了较大提高. 其次, 两次不同尺寸的 ICP 刻蚀在台面中间部位形成一个小的缓冲带, 使得单台面形成双层台阶, 这样就等效降低了每层电极的整体爬坡高度.

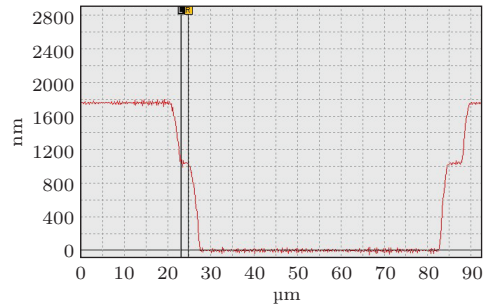


图5 两次 ICP 刻蚀后器件台阶状况

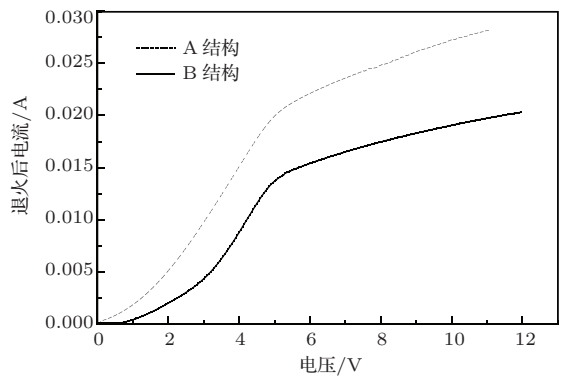


图6 A, B 两种接触结构退火后 I-V 特性对比



图6为退火后A, B两种接触结构源漏电极之间 $I$ - $V$ 特性对比. 根据实验结果和以上解释: 采用A结构(纵向源漏接触孔)的方法在 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $30\text{ s}$ 的退火条件下已经达到欧姆接触, 而采用常规的B结构方法在此退火条件下虽然势垒高度较退火前有所降低, 但是金属层与AlGaIn层反应不充分, 未能形成欧姆接触.

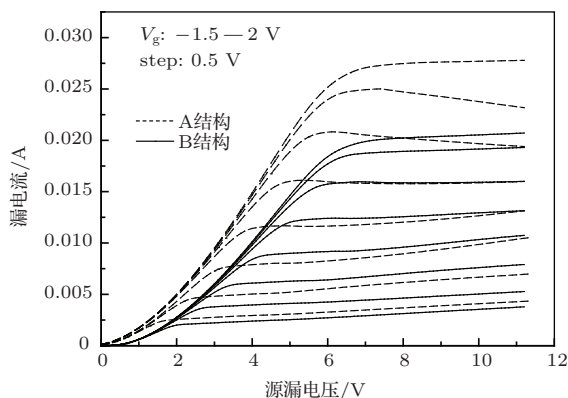


图7 A, B两种结构器件输出特性

图7为A, B两种结构HEMT器件直流输出特性. 从图中容易得出: A结构的跨导较结构大, 这就说明了A结构对信号具有更好的放大特性. 在 $0.5\text{--}2\text{ V}$ 之间, 采用A结构的HEMT器件发生了明显的电流崩塌效应, 而B结构HEMT器件没有出现明显的电流崩塌现象. 电流崩塌效应主要是由于GaIn缓冲层和势垒层中陷阱或者是势垒层表面态<sup>[11-14]</sup>引起, 而本实验中对表面进行了钝化, 排除了势垒层表面态对电流崩塌的作用. 分析实验过程, 刻蚀源漏电极下有源层区域是A, B两种结构工艺流程中惟一不同的地方, 所以, 可以肯定是由于刻蚀纵向欧姆接触孔才导致以上差别. 在进行欧姆电极接触孔的干法刻蚀时, 刻蚀对侧壁损伤并产生缺陷, 后续的源漏电极淀积与损伤部分充分接触, 在高温退火时缺陷与电极一起扩散, 导致势垒层缺陷密度增加, 缺陷最终导致A结构器件发生电流崩塌. 这使得制备带纵向欧姆接触孔结构的HEMT器件时, 在工艺上必须对刻蚀条件或者刻蚀方式经过多次实验来确定减小侧壁损伤的方法, 分两步刻蚀、调整ICP刻蚀中刻蚀功率、气体成分及百分比、反应腔室压力<sup>[15]</sup>和高温退火<sup>[16]</sup>的方法是从工艺方面减小损伤的研究重点. 除此之外, 在器件结构方面, 可以通过添加场板等方式来抑制电流崩塌现象.

## 4 结 论

通过对比纵向欧姆接触孔结构和常规结构的两种HEMT器件, 发现纵向欧姆接触孔结构器件更容易获得欧姆接触, 较常规结构相比可以适当降低形成欧姆接触的退火温度. 同时, 比较Ti/Al/Ti/Au与Ti/Al/Ni/Au两种接触电极, 发现Ti/Al/Ni/Au电极在退火后具有更平滑的表面形貌, 说明Ni的阻挡作用强于Ti. 将纵向欧姆接触孔与常规欧姆接触的GaIn HEMT相比, 纵向欧姆接触孔的器件饱和电流更大, 具有更高的跨导. 但是, 由于在刻蚀电极接触孔时干法刻蚀对侧壁的损伤造成的缺陷向势垒层扩散, 也更容易出现电流崩塌现象. 这就使得在制作纵向欧姆接触孔的GaIn HEMT时需要采用其他刻蚀方法或者是场板等结构抑制其电流崩塌现象.

## 参考文献

- [1] Xie G, Edward X, Niloufar H, Zhang B, Fred Y F, Wai T N 2012 *Chin. Phys. B* **21** 086105
- [2] Kong X, Wei K, Liu G G, Liu X Y 2012 *Chin. Phys. B* **21** 128501
- [3] Duan B X, Yang Y T, Chen K J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 247302 (in Chinese) [段宝兴, 杨银堂, Chen K J 2012 物理学报 **61** 247302]
- [4] Duan B X, Yang Y T 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 57302 (in Chinese) [段宝兴, 杨银堂 2014 物理学报 **63** 57302]
- [5] Mishra U K, Parikh P, Wu Y F 2002 *Proceedings of the IEEE* **90** 1022
- [6] Miller M A, Mohney S E 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 12103
- [7] Dong Z, Wang J, Gong R, Liu S H, Wen C P, Yu M, Xu F J, Hao Y L, Shen B, Wang Y Y 2010 *10th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT)*, Shanghai, November 1-4, 2010 p1359
- [8] Van Daele B, Van Tendeloo G, Derluyn J, Shrivastava P, Lorenz A, Leys M R, Germain M 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 201908
- [9] Van Daele B, Van Tendeloo G, Ruythooren W, Derluyn J, Leys M R, Germain M 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 61905
- [10] Zhu Y X, Fan Y Y, Cao W W, Deng Y, Liu J P 2013 *Chin. J. Lumin.* **34** 1362 (in Chinese) [朱彦旭, 范玉宇, 曹伟伟, 邓叶, 刘建朋 2013 发光学报 **34** 1362]
- [11] Vetury R, Zhang N Q, Keller S, Mishra U K 2001 *IEEE Transactions on Electron Devices* **48** 560
- [12] Hasegawa H, Inagaki T, Ootomo S, Hashizume T 2003 *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures* **21** 1844

- [13] Binari S C, Ikossi K, Roussos J A, Kruppa W, Park D, Dietrich H B, Koleske D D, Wickenden A E, Henry R L 2001 *IEEE Transactions on Electron Devices* **48** 465
- [14] Wei W, Lin R B, Feng Q, Hao Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 467 (in Chinese) [魏巍, 林若兵, 冯倩, 郝跃 2008 物理学报 **57** 467]
- [15] Gong X, Lv N, Hao Y, Li P X, Zhou X W, Chen H F 2007 *Chinese Journal of Semiconductors* **28** 1097
- [16] Lee B H, Lee S D, Kim S D, Hwang I S, Park H C, Park H M, Rhee J K 2001 *Journal of The Electrochemical Society* **148** 592

## Effect of different ohmic contact pattern on GaN HEMT electrical properties\*

Zhu Yan-Xu   Cao Wei-Wei<sup>†</sup>   Xu Chen   Deng Ye   Zou De-Shu

(Key Laboratory of Optoelectronics Technology, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

( Received 16 January 2014; revised manuscript received 27 February 2014 )

### Abstract

In this paper, the AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT (high electron mobility transistors) with different ohmic contact structures are fabricated, and the effect of different ohmic contact pattern on Ga<sub>N</sub> HEMT electrical properties is studied. A conventional ohmic contact electrode structure and a new ohmic contact structure with a contact hole are fabricated and subjected to rapid thermal annealing (RTA) in flowing N<sub>2</sub>. After different structured AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTs are annealed at 750 °C for 30 seconds, in HEMTs with a conventional structure ohmic contact still does not form while in the device with ohmic contact holes a good ohmic contact is already formed. Then the surface morphology of different multilayer electrode structures is measured. Comparing Ti/Al/Ti/Au with Ti/Al/Ni/Au, we can conclude that the structure Ti/Al/Ni/Au has a more smooth surface after annealing. After testing the HEMT devices with different structures, higher transconductance and saturation current are found for the devices with ohmic contact holes. But a serious current collapse phenomenon has been observed when the gate voltage is set between 0.5 V and 2 V.

**Keywords:** AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>, high electron mobility transistors, ohmic contact

**PACS:** 73.40.Kp, 73.40.Vz, 61.72.uj

**DOI:** 10.7498/aps.63.117302

\* Project supported by the Foundation of Beijing Municipal Education Commission (Grant No. KM201210005004), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61107026).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: caoweimei@emails.bjut.edu.cn