文章编号:1001-5078(2016)05-0578-05

· 红外材料及器件 ·

# p型 GaAs 欧姆接触性能研究

刘梦涵,崔碧峰,何 新,孔真真,黄欣竹,李 莎 (北京工业大学光电子技术省部共建教育部重点实验室,北京 100124)

摘 要:为了研究半导体光电器件 p-GaAs 欧姆接触的特性,利用磁控溅射在 p-GaAs 上生长 Ti 厚度在 10~50 nm 范围、Pt 厚度在 30~60 nm 范围的 Ti/Pt/200 nm Au 电极结构。利用传输线 模型测量了具有不同的 Ti、Pt 厚度的 Ti/Pt/200 nm Au 电极结构接触电阻率,研究了退火参数 对欧姆接触性能的影响,同时分析了过高温度导致电极金属从边缘向内部皱缩的机理。结果 表明,Ti 厚度为 30 nm 左右时接触电阻率最低,接触电阻率随着 Pt 厚度的增加而增加;欧姆接触质量对退火温度更敏感,退火温度达到 510 ℃时电极金属从边缘向内部皱缩。采用 40 nm Ti/40 nm Pt/200 nm Au 作为半导体光电器件 p-GaAs 电极结构,合金条件为 420 ℃,30 s 可以 形成更好的欧姆接触。

关键词:半导体器件;欧姆接触;接触电阻率;合金 中图分类号:TN305.2 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2016.05.013

# Study on the Ohmic contact property of p-type GaAs

LIU Meng-han, CUI Bi-feng, HE Xin, KONG Zhen-zhen, HUANG Xin-zhu, LI Sha (Key Laboratory of Opto-Electronics Technology of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to study the ohmic contact property of semiconductor device, Ti/ Pt/ 200 nm Au structure was grown on p-GaAs by magnetron sputtering, the Ti thickness is 10 ~ 50 nm and the Pt thickness is 30 ~ 60 nm. The transmission line model was adopted to calculate the contact resistivity of Ti/ Pt/ 200 nm Au structure in different thicknesses of Ti and Pt. The impact of annealing parameters on ohmic contact was studied, and the mechanism that the metal shrinks from the edge of electrode at high annealing temperature was analyzed. The results show that the lowest contact resistivity is achieved when the thickness of Ti is about 30 nm, and the contact resistivity increases with the increase of Pt thickness. Ohmic contact is sensitive to annealing temperature, and the metal of electrode shrinks from the edge when the annealing temperature is 510 °C. 40 nm Ti/40 nm Pt/200 nm Au electrode structure can obtain better ohmic contact when semiconductor device remains 30 s at annealing temperature of 420 °C.

Key words: semiconductor device; Ohmic contact; contact resistance; alloy

1 引 言

欧姆接触是半导体器件设计和制造过程中关键

技术之一,欧姆接触质量直接影响器件的性能和可 靠性<sup>[1-3]</sup>。良好的欧姆接触要求接触电阻率低,表

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 11204009);北京市自然科学基金项目(No. 4142005);北京市教委创新能力提升计 划项目(No. TJSHG201310005001)资助。

**作者简介:**刘梦涵(1991 -),女,硕士研究生,主要研究方向是大功率半导体激光器。E-mail: menghanliu@emails. bjut. edu. cn

**通讯作者:**崔碧峰(1972-),女,副教授,主要从事大功率半导体激光器的研究。E-mail:cbf@bjut.edu.cn 收稿日期:2015-09-10

面形貌均匀,金属材料向内部扩散深度浅。低接触 电阻率有利于降低器件的阈值和产生较少的热 量<sup>[4]</sup>;均匀的表面形貌避免了器件在大电流工作时 电流集中于电阻较小的点<sup>[5]</sup>,严重时会致使器件烧 毁;金属材料尤其是 Au 在退火过程中易向器件内 部扩散,到达有源区成为非辐射复合中心<sup>[6]</sup>,影响 器件的可靠性。

GaAs 的掺杂浓度,合金条件以及电极材料体系 都对欧姆接触的质量有较大影响<sup>[7-8]</sup>。合金过程按 照快速升温冷却以及尽可能低温短时间的退火原 则,选择合适的退火温度和时间,从而降低金属与半 导体的势垒高度,且使金属材料形成均匀细小的晶 粒结构<sup>[9]</sup>,形成良好的欧姆接触。目前最常用的 p-GaAs 欧姆接触常用的材料体系有 Ti/Pt/Au、Au/ Zn/Au 等。

长期以来,研究者对 n-GaAs 衬底欧姆接触的研 究比较深入,但对 p-GaAs 基欧姆接触的研究远没有 n-GaAs 欧姆接触那么多。Yinghong Wang<sup>[10]</sup>等人分 别研究了 n-GaAs 以及 p-GaAs 最佳合金条件,研究 表明退火 420℃、40s,p 型欧姆接触接触电阻率最低 为 3. 25×10<sup>-5</sup>  $\Omega$ ·cm<sup>2</sup>;Anna Szerling<sup>[6]</sup>等人设计了 一种新型的 p 型欧姆接触结构 Pt/Ti/Pt/Au,有效阻 止了 Au 的内扩,接触电阻率降低到 5×10<sup>-6</sup>  $\Omega$ ·cm<sup>2</sup> 以下。

本文研究了不同的 Ti 层、Pt 层厚度下 p 型欧姆 接触电阻率的大小;研究了不同退火温度和退火时 间对欧姆接触性能的影响;分析了较高退火温度导 致电极金属从边缘向内部皱缩的原因。

#### 2 实验过程

实验采用 MOCVD 生长的 p 型 GaAs 外延片,利 用磁控溅射在 p-GaAs 表面溅射生长不同 Ti 厚度及 不同 Pt 厚度的 Ti/Pt/Au 结构电极。利用传输线模 型(TLM)测量欧姆接触电阻率。利用快速热处理 设备对样品进行合金退火。

过程如下:

(1)将外延片平均分成若干片,依次使用丙酮、 乙醇清洗,在 p-GaAs 上光刻 TLM 图形。利用光刻 胶作掩膜,使用磁控溅射生长不同 Ti 厚度的  $d_{Ti}$  Ti/ 50nm Pt/200 nm Au 结构电极,其中  $d_{Ti}$ 分别为 10 nm、30 nm、50 nm。利用超声去胶剥离,在快速退 火炉中退火 450 °C、30 s。

(2)取8小片外延片,清洗,光刻TLM图形,利
 用光刻胶作掩膜溅射生长不同Pt厚度的30 nm Ti/
 *d*<sub>Pt</sub>Pt/200 nm Au 电极, *d*<sub>Pt</sub>分别为30 nm、40 nm、

50 nm、60 nm。利用超声去胶剥离,在快速退火炉 中退火450 ℃、30 s。

(3)取9小片外延片,清洗、光刻TLM图形,利用光刻胶作掩膜溅射生长30nmTi/40nmPt/200nmAu。取其中5片分别退火390℃、420℃、450℃、480℃、510℃,退火时间均为30s,再取4片分别退火10s、30s、70s、120s,退火温度450℃。

最后利用扫描电镜(SEM)和电子显微镜对表 面形貌进行分析。

3 结果与讨论

3.1 最优 Ti 层厚度分析

利用探针台分别测量  $d_{\rm Ti}$  Ti/50 nm Pt/200 nm Au 三种结构 TLM 电极图形任意相邻两个正方形电极的 I - V 特性,均表现出较好的欧姆接触特性。利用 TLM 模型计算得到不同 Ti 厚度的接触电阻率如表 1 所示。Ti 为 10 nm 时接触电阻率最大,为 1.428 × 10<sup>-5</sup>  $\Omega$  · cm<sup>2</sup>; Ti 为 30 nm 时接触电阻率降低到 8.669 × 10<sup>-6</sup>  $\Omega$  · cm<sup>2</sup>; Ti 厚度增加到 50 nm 时,接触 电阻率再次增大至 9.873 × 10<sup>-6</sup>  $\Omega$  · cm<sup>2</sup>。

表 1  $d_{Ti}$ Ti/50nm Pt/200 nm Au 电极接触电阻率 Tab.1 Contact resistance of the  $d_{Ti}$ Ti/50 nm Pt/200 nm Au

Ti 层厚度/nm	10	30	50
北接触电阻率/(Ω・cm <sup>2</sup> )	1. 428 × 10 $^{-5}$	8. 669 ×10 <sup>-6</sup>	9.873 $\times 10^{-6}$

由表1可知:Ti厚度在10~50 nm 范围内存在 一个使接触电阻率最小的值,这个最小值在30 nm 左右。Ti厚度过薄或过厚都会使接触电阻率增大。 原因在于Ti层较薄时膜层存在较多晶格间隙,电子 运动阻力较大,接触电阻率低;随着Ti厚度增加晶 格间隙被填充,接触电阻率降低;膜厚度继续增加, 由于Ti本体电阻的存在,接触电阻率再次增大<sup>[11]</sup>。 暂时选择30 nm,用于后续实验。

3.2 最优 Pt 层厚度分析

Ti 层厚度为 30 nm,  $d_{\rm Pt}$ 分别为 30 nm、40 nm、 50 nm、60 nm, 30 nm Ti/ $d_{\rm Pt}$  Pt/200 nm Au 电极结构接 触电阻率变化趋势如图 1 所示。随着厚度的增大,接 触电阻率呈现上升趋势。 $d_{\rm Pt}$ 为 30 nm 时,接触电阻率 最小,为 6. 291×10<sup>-6</sup> Ω·cm<sup>2</sup>; $d_{\rm Pt}$ 增大到 40 nm,接触 电阻率增大到 9.608×10<sup>-6</sup> Ω·cm<sup>2</sup>; $d_{\rm Pt}$ 继续增大到 50 nm,接触电阻率略有增加至 10.491×10<sup>-6</sup> Ω·cm<sup>2</sup>;  $d_{\rm Pt}$ 为 60 nm 时接触电阻率为 15.515×10<sup>-6</sup> Ω·cm<sup>2</sup>,欧 姆接触特性开始变坏。由此可知:接触电阻率随着 Pt 层厚度增大而增大,当厚度超过 50 nm,接触电阻 率增速明显变快,欧姆接触特性变坏。上述对 Ti 层 厚度变化对接触电阻率影响的分析同样适用于 Pt 层情况。因为我们研究的 d<sub>Pt</sub>最薄为 30 nm, 膜层晶 格间隙已较小, 所以随着厚度增大, 膜层本体电阻导 致接触电阻率增大。充分考虑 Pt 对合金过程中 Au 以及烧结过程中 In 等焊料向半导体内部扩散的阻 挡作用, 选择 Pt 层厚度为 40 nm。









图 2 不同退火温度 30 nm Ti/40 nm Pt/200 nm Au 电极接触电阻率 Fig. 2 The contact resistance of 30 nm Ti/40 nm Pt/200 nm Au with different annealing temperature

3.3 最佳合金条件分析

3.3.1 不同退火条件对欧姆接触质量的影响

对 30 nm Ti/40 nm Pt/200 nm Au 电极结构退 火 450 ℃,退火时间分别为 10 s、30 s、70 s、120 s,不 同退火时间对欧姆接触表面形貌的影响不大。对接 触电阻率的影响如表 2 所示。

表 2 不同退火时间 30 nm Ti/40 nm Pt/200 nm Au 电极接触电阻率

Tab. 2 The contact resistance of 30 nm Ti/40 nm Pt/200 nm Au with different annealing time

退火时间/s	10	30	70	120
比接触电阻率/	8. 88 × 10 <sup>-6</sup>	7. 129 × 10 <sup>-6</sup>	7. 216 ×10 <sup>-6</sup>	9. 159 × 10 <sup>-6</sup>
$(\Omega\cdot{\rm cm}^2)$				

对 30 nm Ti/40 nm Pt/200 nm Au 分别退火 390 ℃、420 ℃、450 ℃、480 ℃、510 ℃,退火时间均 为 30 s,接触电阻率的变化趋势如图 2 所示,不同退 火温度下电极表面形貌扫描电镜的结果如图 3 所示。





图 3 不同退火温度 30 nm Ti/40 nm Pt/200 nm Au 电极 SEM 图 Fig. 3 SEM analysis of 30 nm Ti/40 nm Pt/200 nm Au annealed at different temperatures

退火温度 390 ℃时接触电阻率最大,为 23.635 × 10<sup>-6</sup> Ω · cm<sup>2</sup>,图 3(a) SEM 表面形貌可以看出表面 有一定的凸起。退火温度在 420 ℃和 450 ℃接触电

阻率变化不大,420 ℃比接触电阻率为7.265×10<sup>-6</sup>  $\Omega \cdot cm^2$ ,450 ℃接触电阻率略有下降至7.128× 10<sup>-6</sup>  $\Omega \cdot cm^2$ 。图3(b)为450 ℃电极表面形貌,与 390 ℃退火相比表面凸起变严重,出现一些较大的颗 粒,表面粗糙度加剧。继续升高退火温度至480℃,接 触电阻率再次上升至11.862×10<sup>-6</sup>  $\Omega \cdot cm^2$ 。温度上 升至510 ℃,电极表面形貌发生重大变化如图3(c) 所示。

由以上分析可知:退火时间对欧姆接触的比接 触电阻率和表面形貌影响较小,欧姆接触性能对退 火温度更敏感。退火温度在 420~450 ℃范围内接 触电阻率变化不大,退火温度越高电极表面粗糙度 越大。按照低温短时间的退火原则,较合适的退火 时间为 30 s,退火温度为 420 ℃。

3.3.2 过高退火温度对金属电极的影响

进一步观察图3(c)可以看出,电极呈现三种形 貌状态。三种形貌的组分如图4所示。



图 4 退火温度 510 ℃、30 s 30 nm Ti/40 nm Pt/200 nm Au 电极扫描电镜质谱分析



第一种状态 Au 电极表面形貌完整,其组分测量如图 4(a) 所示,只测得大量 Au 存在;第二种形貌状态表面呈现较大的颗粒状物,如图 4(b) 所示该部分存在大量的 Au、GaAs 以及少量的 Ti。结合显微照片,我们分析该部分为金属材料和半导体材料形

成的合金层。其中 Ti、Pt 含量较低,在 SEM 的测量 范围内能否检测到是随机的。第三种形貌状态为完 整 Au 层与合金层的交界部分,如图 4(c)所示,该部 分存在大量的 Au 和 Ga,SEM 照片显示该部分金属 已浮起,金属从电极边缘向内部皱缩。对实验第一 部分和第二部分研究的  $d_{\rm T}$ 为 10 nm、30 nm、50 nm、  $d_{\rm Pt}$ 为 30 nm、40 nm、50 nm、60 nm 电极结构  $d_{\rm Tt}$  Ti/ $d_{\rm Pt}$ Pt/200 nm Au 均退火 510 °C、30 s,几种电极结构都 出现图 3(c)的现象。Pt 厚度变化对该现象的程度和 范围影响不大,Ti 厚度的变化对该现象影响较大。





 $(b)d_{Ti}=30 \text{ nm}$ 



 $(c)d_{Ti}=50 \text{ nm}$ 

图 5 退火 510 ℃、30 s 的 d<sub>Ti</sub> Ti/50 nm Pt/200 nm Au 电极表面显微图片 Fig. 5 Micrograph of d<sub>Ti</sub> Ti/50 nm Pt/200 nm Au annealed at 510 ℃ for 30 s

图 5(a)、(b)、(c)分别是 *d*<sub>Ti</sub>为 10 nm、30 nm、 50 nm 时, *d*<sub>Ti</sub> Ti/40 nm Pt/200 nm Au 结构退火 510 ℃、30 s 电极形貌的显微照片。Ti 厚度为 10 nm 时,电极大范围出现电极金属向内部皱缩,且程度较 严重;Ti厚度为30 nm时,皱缩范围依旧较大但程度 减轻;Ti厚度为50 nm时该现象范围和程度明显 减轻。

由以上分析可知:退火过程中电极材料和半导体材料在二者的交界面形成合金层,适当的合金有利于欧姆接触的形成和欧姆接触质量的改善。退火温度升高到 510 °C,退火 30 s, $d_{Ti}$  Ti/ $d_{Pt}$  Pt/200 nm Au 结构电极皱缩对  $d_{Ti}$  变化更敏感,原因与 Ti 的粘附力有关。Ti 层越厚,金属与 GaAs 的粘附力越好,高温下金属聚缩程度越轻。为避免合金过程电极的皱缩,兼顾接触电阻率,应适当增加 Ti 厚度,综合考虑  $d_{Ti}$ 选择 40 nm 比 30 nm 更合适。

## 4 结 论

本文研究了 Ti 层厚度、Pt 层厚度以及合金条件 对欧姆接触性能的影响。分析了高温退火下金属电 极皱缩的机理。综合考虑接触电阻率、粘附力、阻挡 作用等因素,选择 40 nm Ti/40 nm Pt/200 nm Au 作 为 p-GaAs 电极结构,合金条件为退火温度 420 ℃, 退火时间 30 s,用于后续半导体激光器等半导体器 件 p-GaAs 电极的制备。

## 参考文献:

- Yanxu Zhu, Cao Weiwei, Xu Chen, et al. Effect of different ohmic contact pattern on GaN HEMT electrical properties [J]. Acta phys. Sin, 2014, 63 (11):117302.
- Yuxia Wang, Zhang Baoshun, Wang Ling, et al. 808nm
   Semiconductor Laser Ohmic-Contact Technology [J].
   SPIE, 1998, 3547:75 78.
- [3] ZHAO Hongyan, SI Junjie, LU Zhengxiong, et al. The infiuence of annealing process on the performance of AlGaN P-I-N photo diodes with high Al fraction[J]. Laser & Infrared, 37(12), 2007:1283 1286. (in Chinese) 赵鸿燕,司俊杰,鲁正雄,等. 退火对高 Al 组分 Al-GaNP-I-N 二极管光电性能的影响[J]. 激光与红外, 2007, 37(12):1283 1286.
- [4] WANG Yuxia, Ren Dacui. Assembly of 808nm High Power Semiconductor Lasers[J]. Changchun Inst. Opt. & Fine

Mech, 20(4), 1997:53-55.

王玉霞,任大翠.808nm 半导体激光器接触电阻的最 佳工艺[J].长春光学精密机械学院学报,1997,20 (4):53-55.

[5] WANG Yue, LIU Guojun, LI Junchen, et al. Study of the ohmic contact of GaSb-Based semiconductor laser [J]. China Journal of Laser, 2012, 39(1):0102010. (in Chinese)

王跃,刘国军,李俊承,等. GaSb 基半导体激光器功率 效率研究[J]. 中国激光,2012,39(1):0102010.

- [6] Anna Szerling, Piotr Karbownik, Adam Łaszcz, et al. Lowresistance p-type ohmic contacts for high-powerInGaAs/ GaAs 980 nm CW semiconductor lasers [J]. ScienceDirect, 2008, 82:977 - 981.
- [7] WANG Ling, XU Jintong, CHEN Jun, et al. The Ohmic contacts of high Al contents on N-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub> N materials
  [J]. Laser & Infrared, 2007, 37 (supl.):967 970. (in Chinese)
  王玲,许金通,陈俊,等. 高 Al 组分 N Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub> N 材料的 欧姆接触[J]. 激光与红外,2007,37(增刊):967 970.
- [8] LU Wuyue, ZHANG Yongping, CHEN Zhizhan, et al. Effect of different annealing treatment methods on the Ni/ SiC contact interface properties[J]. Actaphys. Sin, 2015, 64(6):067303. (in Chinese) 卢吴越,张永平,陈之,等. 不同退火方式对 Ni/SiC 接 触界 面 性质 的 影 响 [J]. 物 理 学 报, 2015, 64 (6):067303.
- [9] XIE Jinshan. Analysis on the problem of ohmic contact of III – V compound semiconductor lasers[J]. Study on Optical Communications, 1981, (02):40-51. (in Chinese) 解金山.关于III – V族化合物半导体激光器的欧姆接 触问题的分析[J].光通信研究, 1981, (02):40-51.
- [10] Wang Yinghong, Wang Yong, Li Lujie, et al. Research on Rapid Thermal Annealing of OhmicContact to GaAs[J]. IEEE, 2012:61-63.
- [11] SUN Xuwen, XIE Jinshan. Study on Ti-Pt ohmic contact with p-InP and p-GaAs[J]. 1982, (01):187 - 189. (in Chinese)

孙序文,解金山. p-GaAs 和 p-InP 上用 Ti-Pt 欧姆接触的研究[J]. 光通信研究,1982,(01):187-189.