

GaSb 基半导体激光器功率效率研究

王 跃 刘国军 李俊承 安 宁 李占国* 王玉霞 魏志鹏

(长春理工大学高功率半导体激光器国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要 为了提高 GaSb 基半导体激光器的功率效率和可靠性, 研究了 GaSb 基半导体激光器欧姆接触形成机理并提出了一种新型四层金属欧姆接触结构 (Ni/AuGe/Mo/Au)。进行了 Au/Mo/AuGe/Ni/n-GaSb 在 150 °C ~ 450 °C 退火温度下欧姆接触的实验研究, 结果表明, 新结构能够在 250 °C ~ 450 °C 退火温度和 10 min 退火时间下形成良好的欧姆接触并具有较低的接触电阻率, 有效地提高了 GaSb 基半导体激光器的功率效率。俄歇射线能谱分析表明, 新型金属化结构中各原子之间的互扩散减少, 结构表面形貌光滑、平整, 有助于半导体激光器后续封装的进行, 有效地提高了 GaSb 基半导体激光器的可靠性。

关键词 激光器; GaSb 基半导体激光器; 欧姆接触; 接触电阻率; 功率效率

中图分类号 TN244 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0102010

Study of the Ohmic Contact of GaSb-Based Semiconductor Laser

Wang Yue Liu Guojun Li Juncheng An Ning Li Zhanguo Wang Yuxia Wei Zhipeng

(State Key Laboratory on High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract In order to improve the power efficiency and reliability of GaSb-based semiconductor lasers, the formation mechanism of ohmic contact of GaSb-based semiconductor lasers is investigated and a new four-layer metal structure (Ni/AuGe/Mo/Au) is proposed. Au/Mo/AuGe/Ni/n-GaSb annealed at 150 °C ~ 450 °C is studied. The results show that the new structure has good ohmic contact characteristics with a low contact resistance, which is conducive to improve the power efficiency of the semiconductor lasers. It is revealed that the atom in-diffusion is decreased and the new metallization has a smooth surface morphology by the analysis of Auger electron spectroscopy, which contributes to improve the reliability of GaSb-based semiconductor lasers.

Key words lasers; GaSb-based semiconductor lasers; ohmic contact; contact resistance; power efficiency

OCIS codes 140.3380; 140.3390; 140.5960; 250.5960

1 引 言

近红外光电材料和器件引领了光通信高新技术走上产业化, 中红外量子级联激光器 (QCL) 以其小型、实时、远程、高分辨率、高灵敏度、宽光谱范围连续单模调谐的优势在气候变化与环境污染在线实时监测、非侵入医学诊断、国土和社会安全、大气保密通信等应用方向和战略性新兴产业有重要价值^[1]。同时, 采用基于近红外光谱分析的波长调制技术, 结

合谐波检测技术可实现对火灾气体产物中的 CO、CO₂、HCN 浓度的实时检测^[2]。此外, 半导体激光器也可以用于印刷、打标、硬钎焊、金属切割、热处理和照明。中红外半导体激光器在工业、军事和医学领域的广泛应用需要更高的功率转换效率、高的输出效率和好的可靠性^[3]。InGaAsSb、AlGaAsSb 与 GaSb 衬底能较好匹配, 波长可以覆盖 1.7 ~ 4.4 μm 的波段, 是制备中红外波段半导体激光器的主要半

收稿日期: 2011-07-13; **收到修改稿日期**: 2011-09-20

基金项目: 基础科研项目 (A3620080229) 和国家自然科学基金 (61006039) 资助课题。

作者简介: 王 跃 (1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事化合物半导体材料与器件等方面的研究。

E-mail: wangyuebest@126.com

导师简介: 刘国军 (1964—), 男, 博士, 研究员, 主要从事半导体激光器材料、器件及激光器应用等方面的研究。

E-mail: gjliu626@126.com

* **通信联系人**。lzhg000@126.com

导体材料体系^[4]。近年来, AlGaAsSb/InGaAsSb 半导体激光器的相关研究取得了较大进展, 阈值电流和发射功率已达到或接近人们的期望值, 已经在对痕量气体检测上体现出其应用价值。半导体激光器是将电能直接转换为光能的光发射器件, 与气体、固体激光器相比具有更高的转换效率。降低电阻率特别是制备良好的低电阻率的欧姆接触是提高功率效率的关键^[5]。

对于 GaSb 半导体激光器, 国内做过有关金属化结构和退火工艺的研究, 获得的接触电阻较高^[6], 而高温下由于故意内扩散掺杂和 Sb 的非故意外扩散的竞争机制及其他退化机制, 使得 n-GaSb 欧姆接触的退火温度范围和时间范围很小。由于 n 型 GaSb 受到掺杂浓度的限制 (Te 的掺杂粒子浓度只有 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), 并且其费米能级钉扎在价带边缘^[7], 难以形成好的欧姆接触。同时, 在没有扩散阻挡层的情况下, Au 的内部扩散会污染邻层金属, 并且可能会引起器件寿命问题^[8]。

常用的重掺杂方法一种是外延、离子注入、扩散等技术, 另一种是设计一种金属化系统, 在加热条件下合金化或固相再生长, 形成有重掺杂层的金属-重掺杂层-半导体接触结构^[9]。由于 n-GaSb 本身不易重掺杂, 重掺杂至 10^{18} cm^{-3} 是非常困难的, 因此本文采用重掺杂方法设计一种新型金属系统, 提高了欧姆新触性能, 并由此提高了半导体激光器的功率效率及可靠性。

2 样品的实验制备研究

设计了一种新型四层金属系统结构, 如图 1 所示。

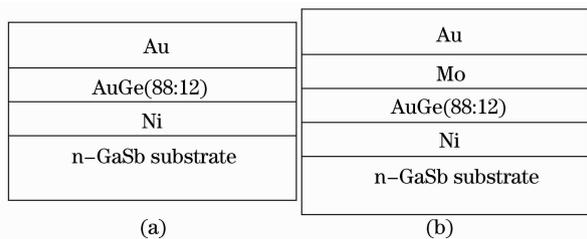


图 1 (a) 常规 Au/AuGe/Ni/n-GaSb 金属系统欧姆接触结构图; (b) 新型 Au/Mo/AuGe/Ni/n-GaSb 金属系统欧姆接触结构图

Fig. 1 (a) Structure of Au/AuGe/Ni/n-GaSb; (b) structure of Au/Mo/AuGe/Ni/n-GaSb

进行了新型金属系统欧姆接触结构 (含 Mo) 和常规金属系统欧姆接触结构 (无 Mo) [图 1(a)] 分别在不同退火温度下 (200 °C、250 °C、350 °C、450 °C)

的对比实验, 以及不同 Mo 层厚度的实验研究。进行了 I-V 特性及总电阻测试, 并用 SX1934 型数字式四探针测试仪对接触电阻进行了测试, 最后用扫描隧道显微镜 (STM) 和俄歇射线能谱仪对样品表面形貌及金属化系统表面物质成分进行测试。

接触电阻 ρ_c 是表征欧姆接触特性的基本参量, 即单位面积金属-半导体接触的微分电阻, 表示为

$$\rho_c \equiv \left. \frac{\partial J}{\partial V} \right|_{V=0}^{-1} \quad (1)$$

接触电阻率是无法直接测定的, 但可以由多种测试方法间接计算获得。测试方法大致可分为两类: 对厚样品 (即在材料上制备欧姆接触图形), 一般用改进的四探针法; 对于薄膜样品 (即在薄膜材料上制备欧姆接触图形), 一般采用传输线法 (TLM) 或圆形传输线法 (CTLM)。TLM 模型制备复杂, 必须要经过台面刻蚀, 但计算简单; CTLM 模型制备相对简单, 但计算复杂。对于待测的接触电阻率较高时, 这三种方法误差不会太大。欧姆接触是在厚度为 500 μm 的 n-GaSb 衬底上直接制备获得的, 所以选用四探针法测量。四探针测试原理结构图如图 2 所示。

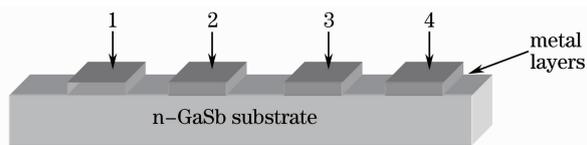


图 2 四探针测试原理结构图

Fig. 2 Four-probe schematic diagram

在 1、4 间通电流, 测 1、2 及 2、3 间电压, ρ_c 的迭代求解公式可表示为

$$\rho_c = \frac{U_{12}}{I_{14}} - R_s - \frac{U_{23}}{I_{14}} \frac{\ln[(3s/a) - (1/2)]}{2/n^2} \quad (2)$$

$$R_s = \frac{4\rho_c}{\pi a^2} \left\{ \frac{\sum_{m=0}^{\infty} Y^m / [2^{2m} (m!)^2]}{\sum_{m=0}^{\infty} Y^m / [(m+1)2^{2m} (m!)^2]} - 1 \right\} \quad (3)$$

$$Y = \frac{\rho a^2}{4\rho_c t} \quad (4)$$

$$A = \frac{\pi a^2}{4} \quad (5)$$

式中 a 为接触圆点 (长条也可以) 直径, t 为样品厚度, s 为四个等间距接触电极的间距。 U_{12} 为 1、2 之间测得的电压, U_{34} 为 3、4 之间测得的电压, R_s 为半导体的薄层电阻, ρ 为体材料的电阻率, A 为接触面积。为了进行对比, 对新型金属系统欧姆接触结构 (含 Mo) 和常规金属系统欧姆接触结构 (无 Mo) 的接触

电阻率进行了测试。

3 结果与讨论

3.1 I - V 测量及 ρ_c 计算

图 3 为 250 °C 合金退火 10 min 后 Au/Mo/AuGe/Ni/n-GaSb 接触的 I - V 曲线,由图可知,退火后 Au/Mo/AuGe/Ni/n-GaSb 呈现良好的欧姆接触特性。

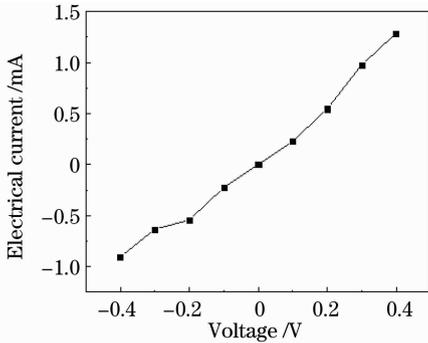


图 3 Au/Mo/AuGe/Ni/n-GaSb 欧姆接触 250 °C 退火 10 min 的 I - V 曲线图

Fig. 3 I - V measurement of Au/Mo/AuGe/Ni contacts to n-GaSb after deposition and after annealing at 250 °C for 10 min

表 1 为新型金属系统欧姆接触结构(含 Mo)和常规金属系统欧姆接触结构(无 Mo)的接触电阻率对比表。可以看出,新型结构接触电阻率较小,且在 250 °C~450 °C 退火温度下均能获得较低的接触电阻率。

表 1 含 Mo 与不含 Mo 结构在不同退火温度下的接触电阻率值

Table 1 Contact resistance of the structures with and without Mo for different annealing temperatures

Temperature /°C	150	250	450
With Mo / ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	1.28×10^{-3}	2.33×10^{-5}	4.61×10^{-4}
Without Mo / ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	1.19×10^{-3}	5.72×10^{-4}	5.24×10^{-3}

3.2 欧姆接触结构扩散影响分析

图 4 为 GaSb 基半导体激光器欧姆接触在不同环境下的俄歇能谱图(AES),对比图中三线可知,金属系统欧姆接触结构分别在不含 Mo 350 °C(黑线)和 450 °C(红线)以及含 Mo 30 nm 350 °C(蓝线)退火 10 min 时(彩图见网络版),样品表面金属元素 Ga、Au、Sb 含量分别为 710、820、1430,1200、710、1800和 1300、1950、1500;常规金属欧姆接触系统随

退火温度升高,衬底中的 Ga、Sb 外扩散及 Au 的内扩散加剧,在温度较高情况下元素间互扩散严重,样品表面 Ga、Sb 的含量已明显超过 Au 的含量,同时 Sb 相对于 Ga 元素的扩散更加严重,这说明含 Sb 化合物形成好的欧姆接触比较困难;此时,掺杂剂 Ge 占据 Sb 空位成为施主杂质,而 Ge 代替 Ga 原子,成为受主杂质,形成重掺杂层,由于杂质补偿作用,重掺杂层浓度降低,而接触电阻与掺杂浓度有直接关系,使接触电阻变大,不利于形成好的欧姆接触。由于 Ga 在 Au 中有较高的溶解度,同时 Au 与 Ge 容易收缩、聚球,n-GaSb 欧姆接触金属化系统在退火温度较高时,Sb 向外扩散及 Au 向衬底扩散非常严重,表面形貌粗糙,界面不平整(如图 5 所示),这样容易产生纵向界面尖峰,在大电流工作时易造成电流集中于电阻较小的点,严重时会造成器件烧毁,影响器件的可靠性。而在新型金属系统欧姆接触结构情况下(蓝线),Sb 的外扩散及 Au 的内扩散明显减少,Sb 扩散的减少有助于形成重掺杂层、减小接触电阻,这有利于提高器件的功率效率及可靠性。同时,对新型金属系统中 Mo 层的厚度进行了实验研究。Mo 层厚度较小时,其阻挡性能在新结构中并不能完全体现出来,而当厚度选择过大时,会造成新型结构电阻增大,更重要的是,在半导体激光器的后续封装、引线过程中容易造成金属电极薄膜脱落、器件结构稳定性下降等后果,因此对 Mo 层厚度要折中考虑。最后选择 Mo 扩散阻挡层为 60 nm 左右。图 6 为 Mo 层厚度为 60 nm,450 °C 退火 10 min 情况时的俄歇能谱图(绿线)与其他环境下的俄歇能谱图(红线、蓝线、黑线)。对比可知,Mo 层厚度增加,原子间互扩散明显减弱,其表面形貌也得到改善,如图 7 所示。此外,对其接触电阻率进行测试发现,并没有明显增加。

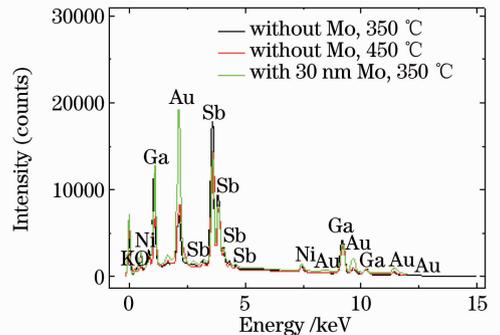


图 4 GaSb 基半导体激光器欧姆接触的俄歇能谱图

Fig. 4 AES analysis of the GaSb-based semiconductor laser

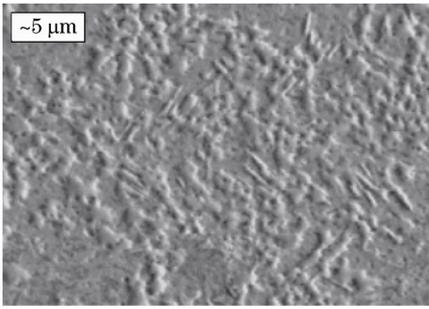


图 5 无 Mo 扩散阻挡层 350 °C 退火 10 min 样品的 STM 图

Fig. 5 STM analysis of the structure without Mo after deposition and annealing at 350 °C for 10 min

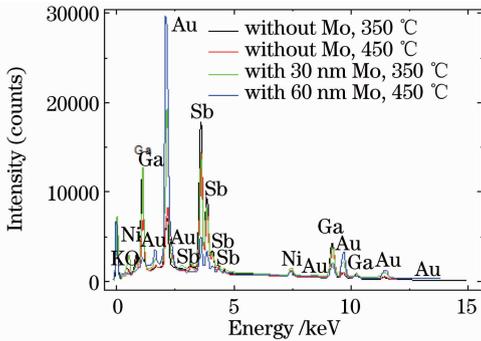


图 6 GaSb 基半导体激光器欧姆接触的俄歇能谱图

Fig. 6 AES analysis of the GaSb-based semiconductor laser

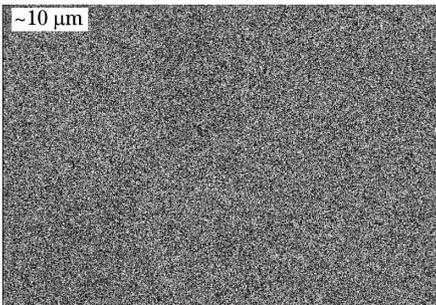


图 7 60 nm Mo 扩散阻挡层 450 °C 退火 10 min 样品的 STM 图

Fig. 7 STM analysis of the structure with 60 nm Mo after deposition and annealing at 450 °C for 10 min

4 结 论

GaSb 基半导体激光器欧姆接触新型 Au/Mo/

AuGe/Ni/n-GaSb 金属化系统, 在较大的退火温度范围 250 °C ~ 450 °C 和退火时间为 10 min 时均能形成良好的欧姆接触并具有低的接触电阻率。接触电阻率的减小提高了半导体激光器的功率效率。样品具有良好的表面形貌, 能够有效地提高 GaSb 基半导体激光器的可靠性。

参 考 文 献

- Li Aizhen. The invention and advancement on unipolar quantum cascade lasers[J]. *Chinese J. Laser*, 2010, **37**(9): 2213~2220
李爱珍. 单极量子级联激光器的发明及其进展[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2213~2220
- Zhao Jianhua, Zhao Chongwen, Wei Zhoujun *et al.*. Study on monitoring multi-component toxic gases based on near-infrared spectroscopic method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 567~573
赵建华, 赵崇文, 魏周君等. 基于近红外光谱技术的多组分毒性气体检测研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 567~573
- Liang Xuemei, Qin Li, Wang Ye *et al.*. 808 nm edge-emitting diode lasers characteristic temperatures[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1390~1395
梁雪梅, 秦莉, 王焯等. 808 nm 边发射二极管激光器温度特性[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1390~1395
- Tang Tian. Study on MBE Growth and Physics of Antimonide Laser and Detector Materials[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Microsystems and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, 2005. 1~15
唐田. 砷化物激光器、探测器 MBE 生长与物理研究[D]. 上海: 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 2005. 1~15
- Jiang Jianping. Semiconductor Laser [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2000. 86
江剑平. 半导体激光器[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000. 86
- Zhong Xingru, Liu Aimin, Li Lanying *et al.*. The study of the ohmic contacts of Ag/AuGeNi/n-GaSb[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 1995, **16**(4): 384~387
钟兴儒, 刘爱民, 林兰英等. Ag/AuGeNi/n-GaSb 欧姆接触的研究[J]. *太阳能学报*, 1995, **16**(4): 384~387
- K. Ikossi, M. Goldenberg, J. Mittereder. Metallization options and annealing temperatures for low contact resistance ohmic contacts to n-type GaSb [J]. *Solid-State Electronics*, 2002, **46**(10): 1627~1631
- C. Lauer, O. Dier, M.-C. Amann. Low-resistive metal/n-InAsSb/n-GaSb contacts [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2006, **21**(9): 1274~1277
- Xu Zhenjia, Ding Sunan. Recent development in ohmic contact for A^{III}B^V compound semiconductors[J]. *Vacuum Science and Technology*, 1994, **2**(14): 71~94
许振嘉, 丁孙安. A^{III}B^V 化合物半导体欧姆接触的研究进展[J]. *真空科学与技术*, 1994, **2**(14): 71~94

栏目编辑: 韩 峰