

DOI:10.16136/j.joel.2023.04.0272

金属/p-GaAs 界面态对接触电阻作用机理的研究

张琛辉¹, 李冲^{2*}, 王智勇¹, 李巍泽², 李占杰², 杨帅²

(1. 北京工业大学 材料与制造学部 先进半导体光电技术研究所, 北京 100124; 2. 北京工业大学 信息学部 光子技术省部共建教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要: 本文针对大功率垂直腔面发射激光器 (vertical cavity surface emitting laser, VCSEL) 阵列热阻大、出光不均匀的问题, 研究 p-GaAs 层欧姆接触电阻值的作用机理, 降低欧姆接触串联电阻的方法, 以提高 VCSEL 阵列出射光功率的均匀性。基于 3 种常用欧姆接触金属 Ti/Au、Ni/Au、Ti/Al/Ti/Au, 研究各层金属厚度和金属组合对与 p 型欧姆接触电阻的作用规律; 结合等离子体表面处理工艺, 改变金属/p-GaAs 界面态, 研究界面态对欧姆接触电阻的影响规律。实验对比分析得到金属 Ti/Au 结构电极欧姆接触的比接触电阻率最低, 为 $3.25 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$; 基于金半接触势垒模型, 通过表面等离子体处理, 界面势垒可降低 12.6% (0.2692 eV 降至 0.2353 eV), 等离子体轰击功率可调控金半界面的势垒和态密度。

关键词: 垂直腔面发射激光器 (VCSEL); 欧姆接触; 比接触电阻率; 等离子体表面处理; 势垒

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2023)04-0358-06

Study on the mechanism of metal/p-GaAs interface state on contact resistance

ZHANG Chenhui¹, LI Chong^{2*}, WANG Zhiyong¹, LI Weize², LI Zhanjie², YANG Shuai²

(1. Institute of Advanced Technology on Semiconductor Optics & Electronics, Department of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Key Laboratory of Opto-electronic Technology, Ministry of Education, Department of Information, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Aiming at the problems of large thermal resistance and uneven light output of high-power vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) array, this paper studies the action mechanism of ohmic contact resistance of p-GaAs layer and the method of reducing ohmic contact series resistance, so as to improve the uniformity of light output power of VCSEL array. Based on three commonly used ohmic contact metals Ti/Au, Ni/Au and Ti/Al/Ti/Au, the effects of metal thickness and metal combination on p-type ohmic contact resistance are studied. Combined with plasma surface treatment process, the interface state of metal/p-GaAs is improved, the effect of metal/p-GaAs interface state on ohmic contact resistance is studied. The experimental comparative analysis shows that the specific contact resistivity of ohmic contact of metal Ti/Au structure electrode is the lowest, which is $3.25 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$. Based on the metal/semiconductor contact potential barrier model, the interface potential barrier can be reduced by 12.6% (0.2692 eV to 0.2353 eV) by surface plasma treatment, and the plasma bombardment power can regulate the potential barrier and density of states on the metal/semiconductor interface.

Key words: vertical cavity surface emitting laser (VCSEL); ohmic contact; specific contact resistivity; plasma surface treatment; barrier

* E-mail: lichong@bjut.edu.cn

收稿日期: 2022-04-14 修订日期: 2022-06-15

基金项目: 北京市自然科学基金 (4202008) 资助项目

0 引言

GaAs/InAlAs 材料系垂直腔面发射激光器 (vertical cavity surface emitting laser, VCSEL) 出光波长覆盖 650—1 300 nm 波段, 具有低的阈值电流、窄的发散角、圆形对光斑、单纵模输出、高速调制能力、可以在片测试等优势, 芯片开发成本低、易实现高密度二维面阵的集成, 实现高功率输出, 相较于传统边发射激光器具有更宽的工作温度范围^[1,2], 广泛应用于短距离光通信、数据中心、激光雷达、3D 感应、激光投影和显示、陀螺仪、芯片原子钟等领域。而且, VCSEL 激光器有源区光程短, 出光功率低于传统边发射激光器, 因此, 具有更高出光功率的 VCSEL 阵列获得越来越多的关注和研究, 但是现今研制的 VCSEL 阵列受到热电阻和出光不均匀的问题的困扰, 未获得预期出的光功率^[3-6]。

研究发现 GaAs/InAlAs 材料系 VCSEL 器件 p 型欧姆接触电阻远大于 n 型^[7,8], 是串联电阻的主要来源, 也是阵列芯片热电阻的主要来源之一^[9], VCSEL 阵列芯片是多激光单元并联、单激光器件注入电流由单元电阻决定的, 因此阵列的出光功率均匀度受到激光单元的电阻的限制^[10]。降低 p 型接触电阻是提高 VCSEL 阵列出光功率和均匀度的重要手段。2016 年, 刘梦涵等^[11]采用 Ti/Pt/Au = 40 nm/40 nm/200 nm 结构制备 p-GaAs 电极, 420 °C、30 s 的快退合金, 得到比接触电阻率为 $7.129 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 的芯片; 2021 年, LIN 等将 p-GaAs 层掺杂浓度提高到 $1.2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, 选择 Ti / Pt / Au = 30 nm / 70 nm / 100 nm 作为电极金属结构, 制备器件的 p 型欧姆接触电极的比接触电阻率达到 $4.8 \times 10^{-6} \sim 5.2 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ ^[12]。2020 年, BEAUCHAMP 等^[13]采用 Au、Ni、Ge 合金作为 p-GaAs (掺杂浓度为 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) 的电极, 在低温下得到了 0.8 Ω 的低欧姆接触电阻。此外, 2017 年, 封波等^[14]在硅衬底 GaN 基 LED 上通过在电极蒸镀前对表面进行 Ar 等离子体处理, 处理前后芯片的正向电压由 3.43 V 降低到 2.92 V, 得到了正向电压更低的芯片, 有效改善了欧姆接触特性。

本文基于氧化台面结构 VCSEL 阵列芯片, 研究影响器件 p 型欧姆接触电阻值的关键因素和作用机理, 在掺杂浓度为 $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 的 p-GaAs 的表面磁控溅射 3 种 p 型金属电极结构 (Ti/Au、Ni/Au 以及 Ti/Al /Ti/Au), 分析不同金属结构以及各金属层厚度对比接触电阻值的影响规律, 其中 Ti/Au = 10 nm / 300 nm 的比接触电阻率最低, 为

$3.25 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$; 利用氮气和氧气两种等离子体轰击 p-GaAs 表面, 可调控接触面的比接触电阻率, 基于金半接触势垒理论和模型, 可得到 N 和 O 等离子体轰击表面后, 金半接触表面势垒可由 0.2692 eV 降低至 0.2353 eV, 降低约 12.6%。

1 理论

传输线模型 (transmission line model, TLM) 是测量金属-半导体间接触电阻最常用的方法^[15]。在半导体上制备间距有序衰减的金属方块, 如图 1 所示。分别在两个相邻方块间通相同电流 I , 得到相应的电压 V 。

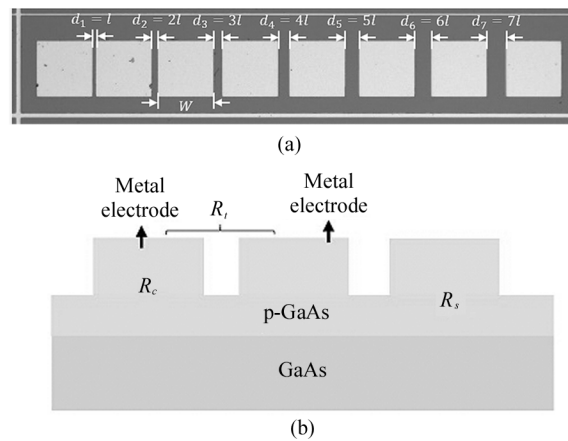


图 1 (a) TLM 测试电极方块显微镜图像;

(b) 测试电极方块截面图

Fig. 1 (a) TLM test electrode block microscope image;

(b) Test electrode block section

半导体表面相邻两个金属电极之间的电阻如式 (1) 所示:

$$R_t = 2R_c + \frac{R_s}{W}d_n, \quad (1)$$

式中, R_t 为两个金属电极之间的总电阻, R_c 为金属与半导体之间的接触电阻, R_s 为半导体材料方块电阻, W 为欧姆接触方块边长, d_n 为欧姆接触方块的间距。衡量欧姆接触质量的关键参数是比接触电阻率 ρ , 其定义式如下:

$$\rho = \frac{R_c^2 W^2}{R_s}. \quad (2)$$

2 结果与讨论

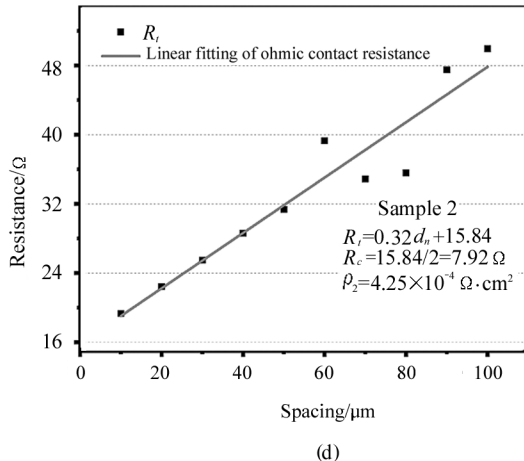
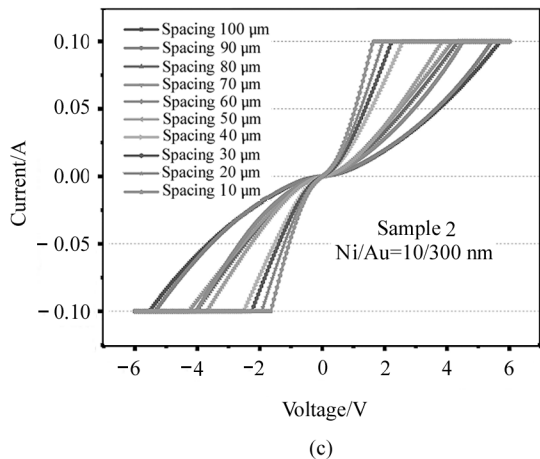
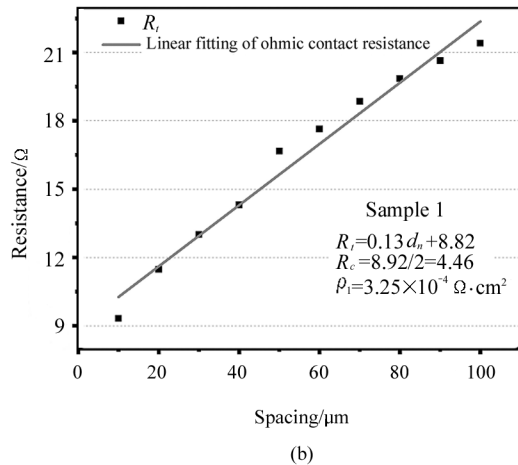
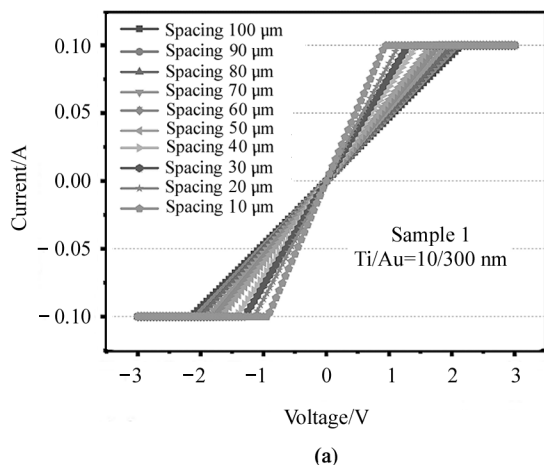
本文采用氧化台面结构的 VCSEL 芯片, p 型欧姆接触层是掺杂浓度为 $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 的 p-GaAs 层。欧姆接触方块边长选择 $W = 220 \mu\text{m}$, 间距 l 为 $10 \mu\text{m}$, 方块电极共有 11 块。采用磁控溅射的方法

制备不同的金属厚度和结构;采用等离子去胶机对 p-GaAs 表面进行等离子轰击处理,以改变金属/p-GaAs 界面态能级和密度,等离子体轰击处理后再进行金属溅射。形成电极图案后,对芯片进行 RTP (rapid thermal processing, RTP) 快速退火处理,利用 Keithley 4200 半导体参数系统配合探针台,将两根探针分别扎在两个相邻的方块电极上,测试其 I - V 曲线,共 10 组。最后利用传输线模型计算金属/p-GaAs 接触面的比接触电阻率,具体结果如图 2 所示(图 2(a)、(c)、(e) 为 I - V 曲线的测试图,图 2(b)、(d)、(f) 为接触电阻的测试拟合图)。

2.1 金属电极结构

在 p-GaAs 表面分别溅射 Ti/Au=10 nm/300 nm (样品一)、Ni/Au=10 nm/300 nm (样品二)、Ti/Al/Ti/Au=20 nm / 300 nm/20 nm/ 100 nm (样品三)3 种电极,经过快速退火合金,测得 3 种金属结构

的电极在一系列间距下的 I - V 曲线,如图 2(a)、(c)、(e) 所示,可以看出样品一的 I - V 曲线具有很好的线性度,形成欧姆接触, I - V 曲线的斜率即为电极电阻的倒数($1/R_c$);而样品二、三的 I - V 曲线呈现“S”形状,类似肖特基接触曲线,因此提取具有相对较好线性度区域的斜率近似计算电极电阻,如样品二提取的是工作偏压 $V_{bias} > 2$ V 区域的 I - V 曲线,样品三提取的 $V_{bias} > 4$ V。提取得到 3 个样品间距与电阻之间的关系见图 2(b)、(d)、(f),通过线性拟合可得到,样品一、样品二、样品三的比接触电阻率分别为 $\rho_1 = 3.25 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$, $\rho_2 = 4.52 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$, $\rho_3 = 7.08 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。金属为 Ti/Al/Ti/Au 时,比接触电阻率较高,是因为电导性不佳的 Al 的厚度过大,影响了整体电极的导电效果。由于样品表面掺杂浓度低($2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$),使得其比接触电阻率对于金属的改变更为敏感,这也是导致本文样品的比接



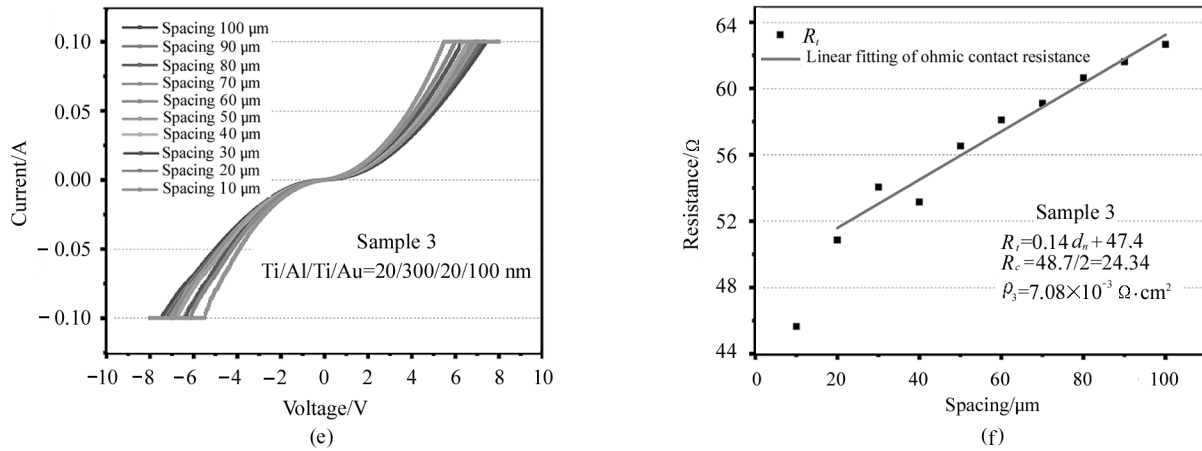


图2 图(a)、(c)、(e)分别为 Ti/Au=10 nm/300 nm、Ni/Au=10 nm/300 nm、Ti/Al/Ti/Au=20 nm/300 nm/20 nm/100 nm 样品的欧姆接触方块的 I - V 曲线图;图(b)、(d)、(f)分别为 Ti/Au=10 nm/300 nm、Ni/Au=10 nm/300 nm、Ti/Al/Ti/Au=20 nm/300 nm/20 nm/100 nm 的欧姆接触电阻线性拟合图

Fig. 2 (a), (c), (e) The ohmic contact block I - V curves of samples with Ti/Au=10 nm/300 nm,

Ni/Au=10 nm/300 nm and Ti/Al/Ti/Au=20 nm/300 nm/20 nm/100 nm, respectively;

(b), (d), (f) The linear fitting diagram of ohmic contact resistance of

Ti/Au=10 nm/300 nm, Ni/Au=10 nm/300 nm and Ti/Al/Ti/Au=20 nm/300 nm/20 nm/100 nm, respectively

触电阻率整体较低的原因。

2.2 界面态

样品二与样品三的 I - V 曲线呈现“S”形状,如图2(c)、(e)所示。分析发现,“S”型 I - V 曲线近似肖特基接触特性^[16], I - V 曲线“S”型代表在不同的偏压下,流过电极方块的电流有一个非线性的变化,这与肖特基接触非常类似。而直线的 I - V 曲线在不同偏压下电流呈现线性变化,这符合欧姆接触特性。而 I - V 曲线的“S”型,是因为电流在流经半导体表面时,遭遇势垒阻碍,需要经过一定电压的积累(“S”型中间区域),冲破势垒区(−2—2 V),得以正常通过(−2 V 以前、2 V 以后呈线性)。如图3(a)所示。样品二、三的势垒高度可根据如下的肖特基势垒计算式得到^[17]:

$$J = J_0 \exp\{qV/kT\} = A^* T^2 \exp\{-q\phi_b/kT\} \cdot \exp\{qV/kT\} = A^* T^2 \exp\{q(V - \phi_b)/kT\}, \quad (3)$$

式中, J 为电极方块距离 100 μm ($d_n = 10l$) 的电流密度, V 为外加偏压, A^* 为有效理查逊系数, 对于 GaAs 半导体, A^* 为 $74.4 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{K}^{2[18]}$ 。提取样品二在 −2—2 V 对应的电流密度 J , 进而计算得到样品二的势垒高度为 0.276 0 eV; 提取样品三在 −2—2 V 对应的电流密度 J , 进而计算得到样品三的势垒高度为 0.323 0 eV。根据样品二计算所得的势垒高度, 计算出理论 I - V 曲线, 与测试 I - V 曲线拟合良好,

如图3(b)所示。

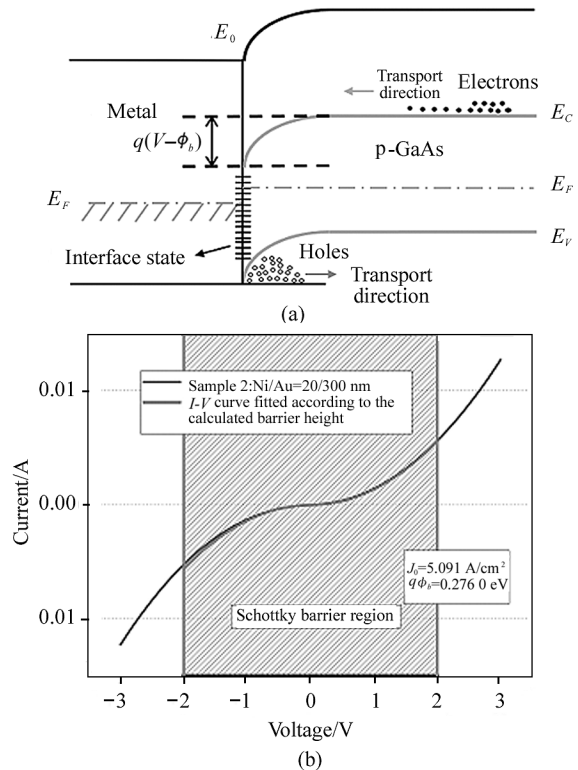


图3 (a) 金属/p-GaAs 接触后的能带图;

(b) 样品二在 $d_n = 10l$ 处的

测试 I - V 曲线及其总电阻的线性拟合

Fig. 3 (a) Energy band diagram of metal/p-GaAs

contact; (b) Test I - V curve and linear

fitting of its total resistance of sample II at $d_n = 10l$

众所周知,界面势垒受到界面态密度的制约,为了进一步研究“S”曲线的特性参数与界面势垒和界面态之间的作用关系,在溅射金属前,利用等离子体气体(主要是氮气和氧气)轰击 p-GaAs 表面,人为调控金属/p-GaAs 界面态,溅射金属 Ti/Au=20 nm/300 nm,并进行退火处理。基于肖特基势垒理论和 I - V 测试曲线,获得势垒与界面态之间的规律和关系。等离子轰击功率和气体流量分别为 100 W、300 W,100 mL/min、300 mL/min,时间均为 30 s。具体测试及分析结果如图 4 所示。

图 4(a)为经过不同条件等离子体处理后计算所得样品的势垒高度,图 4(b)为测试所得不同条件等离子体处理后电极方块间距 $d_n=10l$ 的总电阻。从图 4(a)中可以发现,随着等离子处理的功率以及气体流量的增大,样品的势垒高度降低,而图 4(b)表示随着等离子处理的功率以及气体流量的增大,电极方块间距 $d_n=10l$ 的总电阻在减小。高能等离子体的轰击可能提高了界面处的表面活化能,从而降低欧姆接触电阻^[19],这与金属/半导体接触能带有关,如图 3(a)所示,等离子体对半导体表面的轰击,打破了半导体表面的 Ga-O 键,使得表面形成了更多悬键,提高了表面态密度,使得图中的势垒高度 $q(V-\phi_b)$ 降低,外加电流更容易跨越势垒,进入半导体。而 O 等离子要比 N 等离子更容易形成悬键,因此 O 离子的轰击比 N 离子对欧姆接触电阻的改善更加明显。等离子表面处理前,势垒高度为 0.2692 eV,接触电阻 44.54 Ω ,取所有条件下等离子体处理后样品的势垒高度及接触电阻的加和平均值,得到处理后的平均势垒高度 0.2353 eV,降低了 12.6%,平均接触电阻为 39.76 Ω ,降低了 10.7%。其中,O 等离子处理在功率 300 W、气体流量 300 mL/min 下,势垒高度为 0.2330 eV,比等离子体表面处理前,降低了 13.4%;接触电阻为 38.52 Ω ,比等离子体表面处理

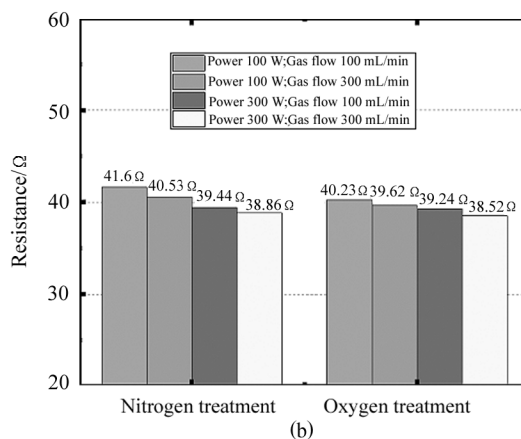
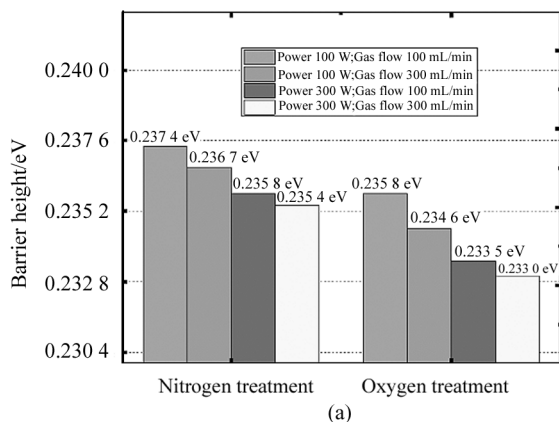


图 4 (a) 经过不同条件等离子体处理后样品的势垒高度;
(b) 不同表面处理条件下电极方块间距 $d_n=10l$ 的总电阻

Fig. 4 (a) The potential barrier height of the sample after plasma treatment under different conditions;
(b) Total resistance of electrode block spacing $d_n=10l$ under different surface treatment conditions

前降低了 13.5%。

3 结 论

本文利用磁控溅射技术在 p-GaAs 材料表面沉积 3 种常见 p 型欧姆接触电极 (Ti/Au、Ni/Au、Ti/Al/Ti/Au),快速退火形成欧姆接触,测试分析得到电极金属结构为 Ti/Au=10 nm / 300 nm 时,可在 p-GaAs 表面形成良好欧姆接触,且具有最低的比接触电阻率 ($3.25 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$)。金半接触势垒过高会造成 I - V 曲线出现类似肖特基接触的“S”形区域,基于界面能带结构理论和肖特基势垒模型,计算得到 Ni/Au 的势垒高度为 0.2760 eV, Ti/Al/Ti/Au 的势垒高度为 0.3230 eV。实验发现,O 等离子和 N 等离子轰击 p-GaAs 表面均可降低界面势垒高度,等离子轰击能量和气体流量越大,欧姆接触电阻越小,界面势垒高度越低;改善效果最明显的是 O 等离子处理在功率 300 W、气体流量为 300 mL/min 时,势垒高度为 0.2330 eV,比等离子体表面处理前,降低了 13.4%;接触电阻为 38.52 Ω ,比等离子体表面处理前降低了 13.5%。

参考文献:

- [1] ZHANG J Y, LI X, ZHANG J W, et al. Research progress of vertical-cavity surface-emitting laser[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2020, 41(12): 1443-1459.
- [2] ZHAO L M, WANG Q, WANG L J, et al. Vertical cavity

- surface emitting lasers and progress[J]. *Laser Technology & Applications*, 2003(7):18-21.
- [3] YU Q H. Ames VCSEL technology supports the rapid development of low-cost solid-state lidar[J]. *Automobile Parts*, 2019(6):28.
- [4] ZUO C, ZHANG X L, HU Y, et al. Has 3D finally come of age? — An introduction to 3D structured-light sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3):0303001.
- [5] LIU D H, LIU Z S. The development of VCSEL laser source for display purpose[J]. *Journal of Shanxi Normal University Natural Science Edition*, 2015, 29(4):37-40.
- [6] ZHAO F. Research of long-distance wide-channel spatial stereo laser illumination system[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2020.
- [7] ZHANG J W, NING Y Q, WANG L J, et al. Optimization of p-DBR of high power vertical cavity surface emitting laser with low series resistance[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(1):65-70.
- [8] GAO H H, GAO J H, LIN S M, et al. Application of Zn diffusion in reducing the series resistance of p-DBR of VCSEL[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 1996, 17(3):5.
- [9] NAKWASKI W, OSIN'SKI M. On the thermal resistance of vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Optical & Quantum Electronics*, 1997, 29(9):883-892.
- [10] HOU L, ZHONG G, ZHAO Y, et al. Fabrication of high-power VCSEL with radial bridge electrodes[J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(8):709-711.
- [11] LIU M H, CUI B F, HE X, et al. Study on the ohmic contact property of p-type GaAs[J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(5):578-582.
- [12] LIN Tao, XIE J N, NING S H, et al. Study on the P-type ohmic contact in GaAs-based laser diode[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2021, 124:105622.
- [13] BEAUCHAMP C B, DIMITRIADIS S, NICHOLLS J T, et al. Superconductivity in AuNiGe Ohmic contacts to a GaAs-based high mobility two-dimensional electron gas[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 117(16):162104.
- [14] FENG B, DENG B, LIU L G, et al. Effect of plasma surface treatment on embedded n-contact for GaN-based blue light-emitting diodes grown on Si substrate [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(4):047801.
- [15] BERGER H H. Models for contacts to planar devices[J]. *Solid-State Electronics*, 1972, 15(2):145-148.
- [16] OSVALD J. Series resistance influence on intersecting behavior of inhomogeneous Schottky diodes I-V curves [J]. *Solid State Electronics*, 2006, 50(2):228-231.
- [17] SZE S M, KWOK K N G. Physics of semiconductor devices [M]. GENG L, ZHANG R Z, translated. 3rd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2008:235-240.
(美)施敏, 伍国钰. 半导体器件物理 [M]. 耿莉, 张睿智, 译. 第3版. 西安: 西安交通大学出版社, 2008:235-240.
- [18] LIU E K, ZHU B S, LUO J S. The physics of semiconductors [M]. 7th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001:203-206.
刘恩科, 朱秉升, 罗晋升. 半导体物理学 [M]. 第7版. 北京: 电子工业出版社, 2011:203-206.
- [19] HWANG J D, Lai Z Y, Wu C Y, et al. Enhancing P-type conductivity in Mg-doped GaN using oxygen and nitrogen plasma activation[J]. *Japanese Journal of Applied Physics. Part 1, Regular Papers & Short Notes*, 2005, 44(4A):1726-1729.

作者简介:

李冲 (1987—)女, 博士, 博士生导师, 副教授。主要从事半导体光电探测器和激光器芯片方面的研究。