

2 μm GaSb 基大功率半导体激光器研究进展

谢圣文^{1,2}, 杨成奥^{1,2}, 黄书山^{1,2}, 袁野^{1,2}, 邵福会^{1,2}, 张一^{1,2}, 尚金铭^{1,2}, 张宇^{1,2},
徐应强^{1,2}, 倪海桥^{1,2}, 牛智川^{1,2}

- (1. 中国科学院半导体研究所 半导体超晶格国家重点实验室, 北京 100083;
2. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

摘要: 2 μm 波段 GaSb 基大功率激光器在诸多领域具有广阔的应用前景, 如气体探测、医疗美容、激光加工等。基于功率提升, 综述和讨论了 2 μm 波段 GaSb 基激光器结构的发展过程, 介绍了目前国内外的研究状况, 讨论和分析了 GaSb 基激光器提升功率、效率的主要技术问题。并详细介绍了该领域近年来在传统激光器中引入的两种新结构, 分析了其技术优势。指出目前 2 μm 波段 GaSb 基大功率激光器面临瓶颈, 并讨论了其发展趋势。

关键词: 大功率半导体激光; 2 μm ; GaSb 基

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0503003

Research progress of 2 μm GaSb-based high power semiconductor laser

Xie Shengwen^{1,2}, Yang Cheng'ao^{1,2}, Huang Shushan^{1,2}, Yuan Ye^{1,2}, Shao Fuhui^{1,2}, Zhang Yi^{1,2},
Shang Jinming^{1,2}, Zhang Yu^{1,2}, Xu Yingqiang^{1,2}, Ni Haiqiao^{1,2}, Niu Zhichuan^{1,2}

- (1. State Key Laboratory for Superlattices and Microstructure, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;
2. College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: 2 μm GaSb-based high power semiconductor laser has a promising prospect in many fields, such as gas detection, medical cosmetology and laser processing. The structure development of 2 μm GaSb-based high power semiconductor laser based on power improvement was reviewed and discussed, the current research situation at home and abroad was introduced, and the principal technical issues in power and efficiency improvement were discussed. Two new structures introduced in traditional lasers in this field were introduced in detail, and their technical advantages were analyzed. It also pointed out the current 2 μm GaSb-based high power semiconductor lasers were facing bottlenecks, and their development trends were discussed.

Key words: high power semiconductor laser; 2 μm ; GaSb-based

收稿日期: 2018-03-07; 修订日期: 2018-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(61790580, 61435012); 国家 973 计划(2014CB643903)

作者简介: 谢圣文(1991-), 博士生, 主要从事 GaSb 基大功率激光器方面的研究。Email: xsw@semi.ac.cn

导师简介: 牛智川(1963-), 研究员, 博士生导师, 主要从事低维半导体光电材料与量子器件方面的研究。Email: zcnium@semi.ac.cn

0 引言

砷化物半导体材料是以 AlGaIn/AsSb 三五族元素为基础的二元、三元、四元甚至五元的化合物材料,其合金晶格常数均在 6.1 \AA ($1 \text{ \AA}=0.1 \text{ nm}$) 左右,是天然晶格匹配的材料体系,非常有利于生长高质量的材料。通过调节组分,禁带宽度可以覆盖 $1.8\sim 5 \mu\text{m}$,是制备中红外光电材料和器件研究的理想材料,在红外对抗、气体探测和空间通讯等诸多领域均有广泛的应用价值^[1-4]。该波段光源包含诸多气体分子(CH_4 、 CO 、 NO 等)吸收峰,可用于诸如远程气体传感、战场毒气检测、污染监测、工业过程监测与控制、生物医学传感光谱学等^[5]。

大功率的 GaSb 基半导体激光器具有高效率、紧凑、可调谐、易于集成、室温操作和长寿命等特点,在民用和军用多方面有广泛的应用前景。另外,还可以作为高效泵浦源泵浦 Tm 或 Ho 掺杂的固体和光纤激光器^[6]。随着外延生长技术的日趋成熟和材料结构、工艺技术的不断优化,GaSb 基中红外半导体激光器领域吸引了诸多大学和研究所的目光。纽约州立大学的石溪分校^[7-11]、海军研究实验室^[12-16]、弗劳恩霍夫研究所^[17-21]、加州理工学院^[22-23]、蒙彼利埃大学^[24-25]、维尔茨堡大学^[26-27]和俄克拉荷马大学^[28-30]等都为 GaSb 基中红外半导体激光器性能提高和稳定以及工作波长的拓展做了出色的工作。

1 GaSb 大功率半导体激光器的发展

AlGaIn/AsSb 三五族材料体系是实现中红外 $2 \mu\text{m}$ 波段激光器高效工作的首选材料,部分带隙和晶格常数如图 1 所示^[1]。GaSb 大功率半导体激光器具有

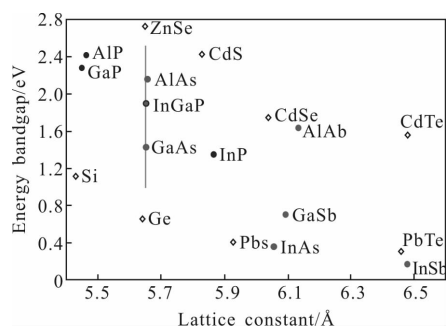


图 1 III-V 族部分合金带隙和晶格常数

Fig.1 Energy band-gap versus lattice constant for III-V semiconductor

波段特殊、性能稳定、空间紧凑等特点,在从激光雷达为代表的军用项目到美容手术为代表的民用项目都有巨大的市场需求^[31]。

1963 年, Melngailis^[32]报道了首个中红外半导体激光器,低温(77 K)工作,激射波长 $3.1 \mu\text{m}$ 。

1985 年, Caneau^[33]等人采用液相外延生长 GaInAsSb/AlGaAsSb 双异质结(DH)结构,制备出首个室温脉冲激射的中红外激光器,激射波长为 $2.2 \mu\text{m}$, 阈值电流密度 6.9 kA/cm^2 。

1986 年, Bell 实验室的研究人员^[34]首次报道用 MBE 方法制备了 GaInSb/AlGaAsSb 双异质结激光器,激射波长为 $2.2 \mu\text{m}$, 可以实现室温脉冲工作,相比液相外延,阈值电流有所降低,但是依旧很大,为 4.2 kA/cm^2 。

双异质结构激光器的最大障碍在于室温连续工作条件下,阈值电流密度非常大,严重影响了器件的性能。之前激光器的输出功率都很低,直到 1992 年, Choi 等人^[35]首次报道了量子阱结构器件。至此,量子阱结构开始代替双异质结结构成为主流。量子阱结构的引入, GaSb 基激光器输出功率得到大幅稳升, 阈值电流降低。采用 MBE 生长 GaInSb/AlGaAsSb 三阱结构,激射波长为 $2.1 \mu\text{m}$, 阈值电流低至 260 A/cm^2 , 激光器输出功率提高到了室温单面 190 mW 。量子阱结构相对双异质结的优势在于引入压应变效应和量子效应,降低了阈值电流,至此大量的研究所的重点投入到量子阱结构上。

很快, 1996 年 David Sarnoff 研究中心^[36]引入分别限制有源区结构, 报道了 GaSb 基 $2 \mu\text{m}$ 波段激光器,最大输出功率达 1.2 W 。宽波导分离限制结构的设计由于减少了掺杂包层中的自由载流子光学损耗而具有较低的内部光损耗,器件发热降低,尤其器件输出功率得到进一步提升。

1997 年, Samoff 研究中心^[37]报道了宽波导 $2 \mu\text{m}$ AlGaAsSb/InGaAsSb 单量子阱器件。设计并制备的 2 mm 腔长的单量子阱激光器,其连续波功率输出 1.9 W , 阈值密度低至 115 A/cm^2 。

2002 年, Rattunde 等人^[38]提出了大光腔 P 面倒装结构,激光器功率得到了进一步的提升。该激光器采用三对压应变量子阱 ($10 \text{ nm In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{Sb}/20 \text{ nm Al}_{0.29}\text{Ga}_{0.71}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$) 结构,激射波长在 $1.98 \mu\text{m}$ 。有源区两边是各 400 nm 的 $\text{Al}_{0.29}\text{Ga}_{0.71}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$ 波导层,限

制层采用的是 $2\ \mu\text{m}$ 的 $\text{Al}_{0.84}\text{Ga}_{0.16}\text{As}_{0.06}\text{Sb}_{0.94}$ 激光器的能带图如图 2 所示。

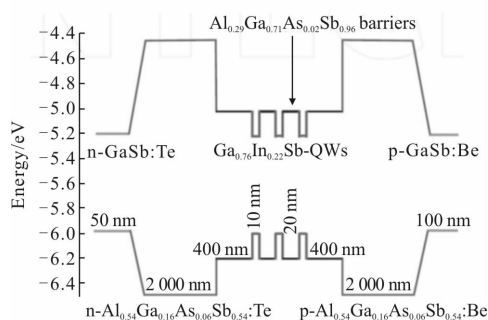


图 2 激光器能带结构

Fig.2 Energy-band structure of laser

由于采用了大光腔结构，激光器的微分电阻和热电阻都大幅度降低，能量损耗减少，激光器可以实现室温最大激射功率为 $1.7\ \text{W}$ 。

2006 年, Rattunde 等人^[39]采用窄波导结构, 将远场发散角降低到半高宽 44° 的同时, 进一步提高了激光器的输出功率, 实现 $2\ \mu\text{m}$ 室温连续激射 $1.96\ \text{W}$ 。宽波导结构和窄波导结构的反射率图见图 3。

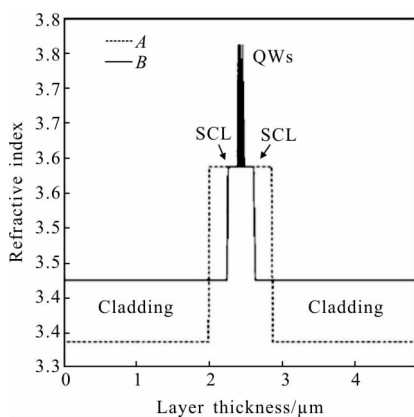


图 3 宽波导结构(A)和窄波导结构(B)的反射率图

Fig.3 Refractive index profile of the broadened waveguide structure (A) and the narrow waveguide structure (B)

同年, Kelemen 等人^[40]实现了同样采用窄波导结构进一步将功率提升, 实现单管室温输出 $2\ \text{W}$, 斜率效率为 $0.32\ \text{W/A}$ 。有源区采用三对压应变 ($\epsilon_{\perp} = 1.02\%$) $\text{Ga}_{0.83}\text{In}_{0.17}\text{Sb}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}_{0.03}\text{Sb}_{0.97}$ (10 nm/20 nm) 量子阱, 波导层为 $120\ \text{nm}\ \text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}_{0.03}\text{Sb}_{0.97}$, 限制层采用的是 $2\ \mu\text{m}$ 晶格匹配的 $\text{Al}_{0.50}\text{Ga}_{0.50}\text{As}_{0.04}\text{Sb}_{0.96}$ 。背面生长两对 Si/SiO_2 高反膜 ($>95\%$), 出光面采用反射率

3% 的 SiN 薄膜。

2010 年, DILAS^[41]报道了 $20\ ^\circ\text{C}$ 在 $1940\ \text{nm}$ 处常温连续波输出 $1.4\ \text{W}$ 的 GaSb 基器件。在 $30\ \text{A}$ 下测量超过 $9\ \text{W}$, 脉冲时间为 $500\ \text{ns}$, 占空比为 1% , 不存在 COMD, 器件远场半高宽为 44° , 可以使用标准光学元件和高效耦合光纤。即使连续工作 $10\ 000\ \text{h}$ 后, 所有激光器也只显示出逐渐退化。目前 DILAS 公司 GaSb 基激光器器件达到产品化标准, 已经商用化。

在过去几年中, 国内铋化物半导体光电材料和器件研究也取得了飞速的发展, 希冀逐步应用到实际的光电器件当中。目前主要有中国科学院半导体研究所超晶格重点实验室、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、上海微系统与信息技术研究所等单位开展了铋化物激光器的研制。近年来, 结合国内外先进课题组的经验, 笔者所在课题组对 GaSb 基大功率半导体激光器从激光器结构设计、外延生长优化和工艺流程优化都做了大量的工作, 在 GaSb 基 I 型量子阱激光器方面取得了重大进展^[42-46]。采用 MBE 生长了 $2\ \mu\text{m}$ 双阱 $\text{InGaSb}/\text{InGaAsSb}$ 激光器, 其常温连续工作输出功率为 $1.45\ \text{W}$, 最高光电转化效率为 25.2% , 如图 4 所示。另外做了 Bar 条研究, 当注入电流为 $70\ \text{A}$ 时, 在 $10\ ^\circ\text{C}$ 时, 20 个未镀膜单管线性阵 bar 条阵列可实现了常温连续 $8.56\ \text{W}$ 的功率输出, 如图 5 所示。

在波长拓展方面同样做了研究, 如 $2.4\ \mu\text{m}$, $2.75\ \mu\text{m}$ 均取得进展^[42-43]。通过采用五元合金 AlGaInAsSb 替代四元势垒 AlGaAsSb , 将研究波长拓展至 $3.8\ \mu\text{m}$ 光谱^[46]。

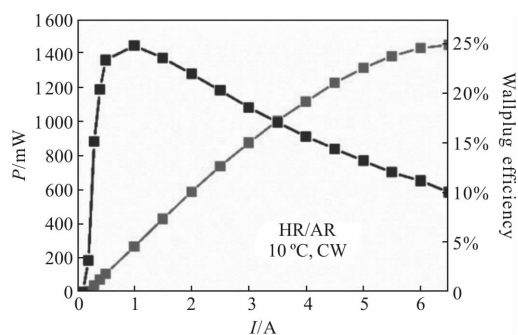


图 4 $10\ ^\circ\text{C}$ 下, 连续波操作下, 激光器单管(腔面增反/增透) 功率-效率-电流关系曲线

Fig.4 Power-efficiency-current characteristics curve measured for HR/AR coated single laser at CW operation at $10\ ^\circ\text{C}$

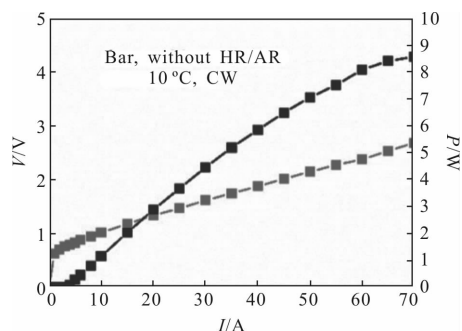


图 5 10 °C 下,连续波操作下,激光器 bar 条(腔面增反/增透) 功率-电压-电流关系曲线

Fig.5 Power-voltage-current characteristics curve measured for HR/AR coated laser bar at CW operation at 10 °C

2 GaSb 基大功率激光器难点

三五族半导体在中红外波段的大功率激光器器件研究中有巨大的优势,但是也有它本身的问题。GaSb 基大功率半导体激光器在激光器结构的设计中,价带带阶过小一直是一个关键的问题。导带带阶和价带带阶越大,载流子泄漏就会越小,激光器的特征温度就越高。AlGaAsSb/InGaAsSb 材料中,与导带带阶相比,价带带阶要小得多,即使是 GaSb/AlGaAsSb 的价带带阶也不会超过 0.15 eV。随着 In 组分增加,价带带阶更会进一步降低。价带带阶很小,一直是制约 GaSb 基大功率激光器功率提高的一个重要难题,必须选择合适材料参数或通过特定的手段来提高量子阱价带带阶。

目前提高价带带阶主要采用两种手段,一是在量子阱中引入一定量的压应变,2 μm 多量子阱激光器阱层 InGaSb 的应变通常大于 0.5%,但是应变过大,超过一定的临界厚度,会引入大量的失配位错,成为非复合中心,影响激光器的功率提高。另一种是引入 AlGaInAsSb 五元势垒材料,五元材料的引入为量子阱能带设计带来了更大的自由度。但是 AlGaInAsSb 五元材料的生长比较难控制,生长质量差,只会适得其反。

除了从提高量子阱价带考虑,还可以通过生长电子阻挡层和空穴阻挡层来等效提高带阶,减小载流子泄露。

实现 GaSb 基大功率激光器的研制,也就意味着提高其电光转换率 η_0 。光电转换效率是衡量二极管激光器性能的重要指标。提高光电转换效率,可以获

得更大光输出,同时意味着减小损耗。

$$\eta_0 = \frac{\text{激光器光功率}}{\text{消耗电功率}} = \frac{P_{\text{out}}}{I \times V} \quad (1)$$

式中: P_{out} 为激光器出射光功率; I 为通过管芯的电流; V 是管芯两端的所加电压。

2003 年美国开展的超高效率二极管项目(SHEDS),其中以 Nlight 和 Alflight 为代表的主要目标^[47]就是提高光电转换效率,研发高亮度、高功率的激光器,为笔者提供了新的思路。

从损耗的方面考虑,功率损耗主要分为三部分:电压的浪费、电流的浪费以及光学损耗。

$$V = V_0 + V_R + V_d \quad (2)$$

式中: V_0 为激光器的开启电压; V_R 为激光器材料的体电阻和电极处的金属电阻; V_d 为激光器各个异质结界面能带为对准引起的压降。

电压的浪费是指电极处金属与半导体导通电压、各种异质结界面能带未对准导致的压降以及半导体材料本身和金属层的寄生电阻上的分压。

$$P_{\text{out}} = \eta_d \times \frac{h\nu}{e} \times (I - I_{\text{th}}) \quad (3)$$

式中: η_d 为激光器外微量子效率; I_{th} 为激光器阈值电流; h 为普朗克常数; ν 为激光器输出光功率; e 为电子量。

电流浪费包括实现有源区域粒子束反转、材料增益阈值电流以及溢出激光器有源区的泄漏电流。

$$\eta_0 = \eta_{\text{elec}} \times \eta_{\text{inter}} \times \eta_{\text{optic}} \quad (4)$$

$$\eta_{\text{optic}} = \frac{\ln(1/R_F)}{A + \ln(1/R_B) + \ln(1/R_F)} \quad (5)$$

式中: η_{inter} 为内量子效率; η_{optic} 为光学提取效率; A 为光在腔内震荡时腔内的吸收和损耗; $\ln(1/R_F)$ 是前腔面的出光损耗,即激光器输出的光功率; $\ln(1/R_B)$ 为后腔面的出光损耗。

光学损失包括两部分:一是激光器内部的损耗,主要是指自由载流子吸收;二是而外部损耗,如激光背面出射或在所需的远场角以外出射的能量(以上公式并未考虑)。

GaSb 基半导体激光器尤其需要考虑工作温度升高导致的电流阈值和泄漏的增加以及工作不稳定等问题。

由此可见提高光电转换效率,可以通过提高材料生长质量,提高内量子效率,减小光损耗,减小阈值电流,减小异质结带阶,减小材料体电阻等方面入

手。但是整体提高器件的激光器输出,是一个统筹考量的问题,需要考虑多方面原因的制约。比如文献报道,材料体电阻主要来源于波导层,可以通过对波导层轻掺杂,降低电阻,但是掺杂后的波导层会导致光损耗的增加。再比如采用大光腔结构可以减少光场与重掺杂限制层的交叠,减小内损耗,提高光学灾变损伤阈值,但是也会提高工作电压。所以提高激光器的性能,提高功率输出是一个各个参数不断磨合优化的漫长过程。总的来说,提高激光器的输出功率和效率主要是减小激光器内损耗和降低阈值电流。目前人们尝试对传统的量子阱结构进一步优化,提出新的结构,来改善功率和效率。

3 GaSb 基大功率新结构

3.1 基于窄波导的非对称结构

使用宽波导结构可以实现 $2\ \mu\text{m}$ 波段 GaSb 连续波输出超过 1 W,但是器件远场发散角半高宽均在 65° 左右^[37]。如此大的发散角不利于实际应用中光束的耦合,由此人们提出了采用窄波导结构。文献报道采用 $150\ \mu\text{m}$ 条宽,可以实现控温 $17\ ^\circ\text{C}$, 1.96 W 的连续功率波输出,同时远场发散角半高宽可以降低至 44° ^[43]。但是窄波导引入的问题是光场与 P 面高光损耗区交叠大大增大,发热严重,器件工作不稳定。

对于宽波导和窄波导,理论研究证明,随着电流的增大,两种结构光电效率都会迅速降低。前者是因为光学限制层的吸收损耗,后者是因为 P 层限制层的吸收损耗。但是电流越大,相比之下,宽波导结构优势越弱,理论得到的最优的波导层越窄。对于相同的波导层厚度,非对称波导有着更高的效率。窄对称波导的优势在于窄的波导确保了低的光学限制层的电流密度,窄非对称波导优势在于由于更多的光学模式进入到了光吸收更小的 n 型限制层,光损耗降低。

进而人们提出了采用窄波导加非对称结构,将光场引入光损耗较小的 N 面。起初采用这种结构,功率输出很低,仅有 50 mW,但是快轴发散角半高宽降低到了 30° 。进一步调整非对称结构,纽约州立石溪分校 Jianfeng Chen 等人^[49]有所突破,报道了采用非对称波导器件实现 GaSb 基 $2\ \mu\text{m}$ 波段室温连续波输出功率 1.5 W,电光转换效率在最大输出功率处保持大于 10%,另外远场发散角仅有半高宽 42° ,比传

统的宽波导要 65° 要好得多^[50]。

他们报道的器件有源区采用 3 对压应变 $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{Sb}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}_{0.03}\text{Sb}_{0.97}$ (7 nm/20 nm) 量子阱结构,量子阱位置位于近场分布最大处。非对称在于,P 面光波导采用为 $360\ \text{nm}\ \text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}_{0.03}\text{Sb}_{0.97}$,N 面光波导结构 $170\ \text{nm}\ \text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}_{0.03}\text{Sb}_{0.97}$;P 面限制层采用 $1\ \mu\text{m}\ \text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As}_{0.06}\text{Sb}_{0.94}$ (前 $400\ \text{nm}\ \text{Be}$ 掺杂 $10^{17}\ \text{cm}^{-3}$,后 $600\ \text{nm}$ 掺杂浓度 $10^{18}\ \text{cm}^{-3}$),N 面限制层则采用 $2.5\ \mu\text{m}\ \text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.45}\text{As}_{0.09}\text{Sb}_{0.94}$ (Te 掺杂 $10^{18}\ \text{cm}^{-3}$)。和传统简单的非对称波导相比,他们在 P 面和 N 面的波导层厚度和折射率台阶均做了调整。能带结构如图 6 所示。

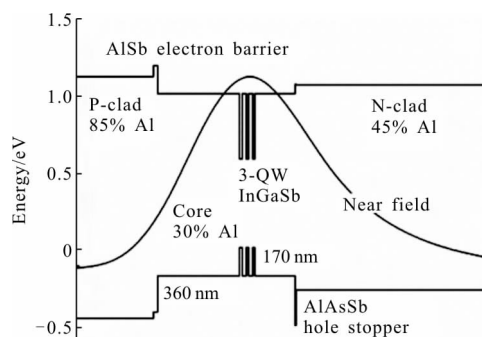


图 6 激光器能带与近场分布交叠图

Fig.6 Energy-band diagram of laser structure overlapped with near field distribution

采用这种结构,他们制备的 GaSb 基 $2\ \mu\text{m}$ 波段器件采用 $100\ \mu\text{m}$ 条宽,3 mm 腔长,出光面背光面 AR/HR (<5%/95%) 镀膜,倒装,室温连续波输出为 1.5 W,阈值电流密度为 $110\ \text{A}/\text{cm}^2$,外量子效率为 40%。 $T_0=80\ \text{K}$, $T_1=250\ \text{K}$,有较好的温度特性,见图 7。

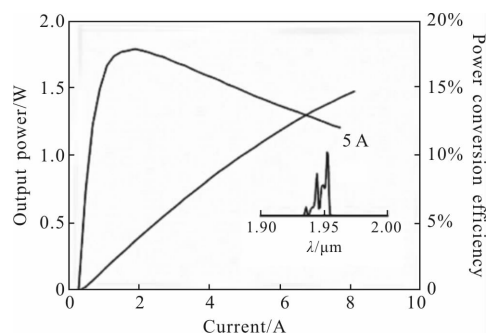


图 7 $10\ ^\circ\text{C}$ 下,连续波功率输出与能量转换效率关系

(插图为 5 A 时激光器光谱图)

Fig.7 CW power output and energy conversion characteristics

(Inset shows laser spectrum at 5 A)

窄的非对称波导结构由于 P 面波导层减薄, 具有更低的串联电阻, 降低工作电压; 采用倒装结构后, 有源区距离散热铜块更近, 加快了散热; 另外 P 面波导层与限制层组分差别大, 折射率差值大, 光场可以更多地进入 N 面波导层, 所以对光场的吸收损耗也会变小。另外, 有源区厚度 dQW 不变, 光学限制因子 IQW 变小, 有效光点尺寸 dQW/IQW 的值变大, 改善了出光功率。

3.2 引入超晶格结构(载流子注入区和阻挡区)

GaSb 基 2 μm InGaAsSb/AlGaAsSb 量子阱大功率半导体激光器在激光器结构的设计中, 价带带阶过小一直是一个关键的问题。能带带阶过小, 会导致器件大漏电流, 大的阈值电流和差的器件的温度特性。特别是在结构引入非对称之后, 带阶问题显得尤为重要。为了从能带设计上解决该问题, 许多单位报道了采用 III-V 组二元超晶格结构来优化能带设计。

Jianfeng Chen 等人^[50]在引入非对称结构后, 为了补偿带阶过小, 在 P 面限制层和波导层之间增加了 20 nm AlSb 电子阻挡层; 在 N 面限制层和波导层之间增加了 5 nm AlAs_{0.1}Sb_{0.9}, 实现了 GaSb 基 2 μm 波段单管 1.5 W 功率输出。研究表明, 载流子阻挡层可以有效降低 Auger 复合, 抑制量子阱中载流子向限制层的溢出, 降低器件的阈值电流, 提高输出功率, 改善器件温度特性。

InAs 和 GaSb 的能带差异可以用来设计 GaSb 基级联器件。通过掺杂实现 GaSb/InAs 异质结界面载流子有的带间隧穿, 而不会引入自由载流子吸收, 这种性质通常用来实现 GaSb 基大功率激光器在低于 2 μm 和高于 3 μm 的器件设计^[51]。Takashi Hosoda 等人利用这种特点, 优化了 GaSb/InAs 隧穿结和载流子注入区, 使其能实现 2 μm 波段级联泵浦^[52]。实现了 GaSb 基 2 μm 波段单管 2 W 的功率输出, 证明了该结构的可行性。

能带结构如图 8 所示, 限制层采用掺杂的 1.5 μm 厚 Al_{0.8}Ga_{0.2}As_{0.07}Sb_{0.93}, 波导层采用两边各 400 nm 非掺 Al_{0.3}Ga_{0.7}As_{0.05}Sb_{0.93}。在左右波导层之间采用 8 nm In_{0.25}Ga_{0.75}Sb 量子阱双阱结构。连接 QW1 和 QW2 的不是传统的 20 nm AlGaAsSb 势垒或者波导层, 而是超晶格隧穿结和载流子注入区。

按照生长方向, QW1 后面为 100 nm AlGaAsSb 组分渐变层, 渐变至 10 nm GaSb。之后是 AlSb/InAs

啁啾超晶格电子注入区, 其中 InAs 是 5e10¹⁷ cm⁻³Te 掺杂 (通过掺杂调节能带)。对于电子的输运, 由于 AlGaAsSb 和 QW1 导带带阶的存在, 阻止电子由 QW1 进入 QW2。QW2 中的电子是来自 GaSb 价带, 10 nm GaSb 层中价带中电子隧穿通过 2.5 nm AlSb 导带进入啁啾 AlSb/InAs 超晶格电子注入区, 最后电子被注入到 QW2, 进行复合发光。

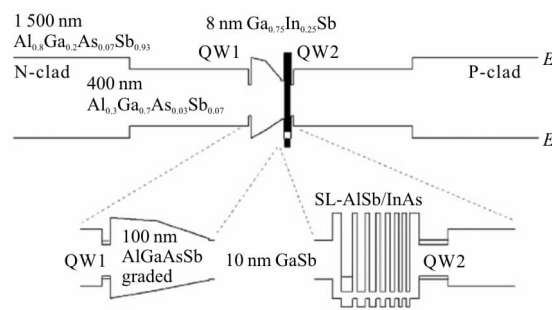


图 8 激光器异质结平带能带图

Fig.8 Energy band diagrams of the laser heterostructure under flat band condition

他们对隧穿结和载流子注入区结构进行了优化, 以适应 2 μm 波段工作。发现当 AlGaAsSb 渐变层中 Al 最初组分提高到 80%, 掺杂水平采用 Te 掺杂 10¹⁷ cm⁻³, 另外在 100 nm 渐变层之前增加 30 nm Al_{0.8}Ga_{0.2}As_{0.07}Sb_{0.93} 层还可以进一步提高器件性能。最后报道了采用 100 μm 条宽, 3 mm 腔长, 激光 2 μm 的 GaSb 基级联器件, 可以实现室温 2 W 连续波输出, 最大光电转换效率为 20%, 阈值电流密度 80 A/cm², 如图 9 所示。

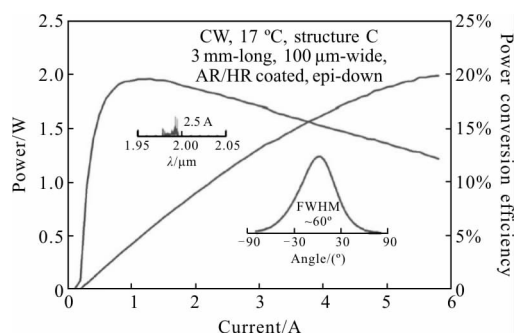


图 9 17 °C, 激光器连续波工作下, 光-电流-功率关系曲线 (插图为器件光谱和快轴远场图)

Fig.9 CW light-current-power conversion characteristics measured at 17 °C (Insets show device's emission spectra and fast axis far field pattern)

根据文献报道, GaSb 基大功率激光器基于传统量子阱结构的单管功率输出最高约为 2 W。目前看来, 已经达到一个瓶颈期, 人们将更多的目光转投到波长拓展, 光束质量提高, 温度稳定性提升等方面。输出功率的进一步提升势必要对传统结构进一步优化, 引入非对称结构或者超晶格结构等新结构。

4 结 论

GaSb 基大功率半导体激光器在医疗、环保、通讯和军事等诸多领域有着重要的应用价值和前景。目前 GaSb 基大功率器件的研究仍存在相当大的难度, 随着结构的复杂度提高, 高质量的外延材料越发难长, 另外工艺方面, 尤其是国内, 工艺的不成熟和不稳定性仍有待深入的研究和解决。其次 GaSb 材料本身热传导性很差, 仍是实现大功率激射的瓶颈所在。另外, 基于 GaSb 基 2 μm 波段大功率激光器的应用产品, 还需要进一步的开发和研制。随着新型器件结构的创新, 相信 GaSb 基 2 μm 波段大功率激光器性能将得到提高和稳定, 将会有越来越多的应用领域。

参 考 文 献:

- [1] Peters M, Rossin V, Zucker E. High-power high-efficiency laser diodes at JDSU [C]//High-Power Diode Laser Technology and Applications V, 2007: 1217–1222.
- [2] Scholle K, Lamrini S, Koopmann P, et al. 2 μm Laser Sources and Their Possible Applications[M]. [S.L.] Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics, 2010.
- [3] Werle P. A review of recent advances in semiconductor laser based gas monitors[J]. *Spectrochimica Acta Part A Molecular & Biomolecular Spectroscopy*, 1998, 54(2): 197–236.
- [4] Sun Quanshe, Chen Kunfeng, Shi Xueshun. Mid infrared laser power stabilizer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 2127–2131. (in Chinese)
孙权社, 陈坤峰, 史学舜. 中红外激光器功率稳定器技术 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(7):2127–2131.
- [5] Zhang Dongyan, Wang Rongrui. Progress on mid-infrared lasers[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(5): 487–491. (in Chinese)
张冬燕, 王戎瑞. 高功率中红外激光器的进展 [J]. *激光与红外*, 2011, 41(5): 487–491.
- [6] Lamrini S, Koopmann P, Schäfer M, et al. Efficient high-power Ho:YAG laser directly in-band pumped by a GaSb-based laser diode stack at 1.9 μm [J]. *Applied Physics B*, 2012, 106(2): 315–319.
- [7] Garbuzov D Z, Menna R J, Maiorov M A, et al. 2.3–2.7 μm room-temperature cw operation of InGaAsSb/AlGaAsSb broad-contact and single-mode ridge-waveguide SCH-QW diode lasers [C]//Optoelectronics '99-Integrated Optoelectronic Devices. International Society for Optics and Photonics, 1999: 124–129.
- [8] Belenky G L, Kim J G, Shterengas L, et al. High-power 2.3 μm laser arrays emitting 10 W CW at room temperature [J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(12): 737–738.
- [9] Belenky G, Shterengas L, Donetsky D, et al. Advances in Type-I GaSb based lasers [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2008, 47(10): 8236–8238.
- [10] Belenky G, Shterengas L, Kipshidze G, et al. Type-I diode lasers for spectral region above 3 μm [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, 17(5): 1426–1434.
- [11] Lin Y, Suchalkin S, Kipshidze G, et al. Effect of hole transport on performance of infrared type-II superlattice light emitting diodes [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(16): 757.
- [12] Yang R Q, Bradshaw J L, Bruno J D, et al. Room temperature type-II interband cascade laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 81(3): 397–399.
- [13] Vurgaftman I, Meyer J R. High-performance interband cascade lasers emitting in the 2.9–4.2 μm wavelength range [C]//SPIE, 2009, 7230: 747–748.
- [14] Bewley W W, Kim C S, Kim M, et al. A new generation of interband cascade lasers[C]//15th International Conference on Narrow Gap Systems, AIP Conference Proceeding, 2011, 1416(1): 46–48.
- [15] Vurgaftman I, Bewley W W, Merritt C D, et al. Physics of interband cascade lasers [C]//Quantum Sensing and Nanophotonic Devices IX, International Society for Optics and Photonics, 2012: 87–94.
- [16] Vurgaftman I, Meyer J R. Mid-IR distributed-feedback interband cascade lasers [C]//Quantum Sensing and Nanophotonic Devices X, 2013: 1372–1375.
- [17] Popov A, Sherstnev V, Yakovlev Y, et al. High power InAsSb/InAsSbP double heterostructure laser for continuous wave operation at 3.6 μm [J]. *Applied Physics Letters*, 1996, 68(20): 2790–2792.
- [18] Simanowski S, Herres N, Mermelstein C, et al. Strain adjustment in (GaIn)(AsSb)/(AlGa)(AsSb) QWs for 2.3–2.7 μm laser structures[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2000,

- 209(1): 15–20.
- [19] Mermelstein C, Rattunde M, Kiefer R, et al. Physics and applications of III–Sb–based type–I QW diode lasers [C]// Proceedings of SPIE –The International Society for Optical Engineering, 2002, 4651: 173–184.
- [20] Kelemen M T, Rattunde M, Wagner J. Mid-infrared high-power diode lasers and modules [C]//SPIE, 2010, 7583: 75830O.
- [21] Kaspar S, Rattunde M, Töpper T, et al. Recent advances in 2– μm GaSb–based semiconductor disk laser–Power scaling, narrow-linewidth and short-pulse operation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19 (4): 1501908.
- [22] Yang R Q, Hill C J, Yang B H. High-temperature and low-threshold midinfrared interband cascade lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(15): 151109.
- [23] Hill C J, Mansour K, Qiu Y, et al. Thermoelectric cooled mid–IR interband cascade lasers [C]//Semiconductor Laser Conference, 2006 Conference Digest, 2006: 93–94.
- [24] Rodriguez J B, Cerutti L, Tournie E. GaSb–based, 2.2 μm type –I laser fabricated on GaAs substrate operating continuous wave at room temperature [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(2): 1875.
- [25] Tournié E, Sanchez D, Cerutti L. Single mode operation of monolithic GaSb VCSELs[C]//Mirsens, 2012.
- [26] Motyka M, Ryczko K, Sek G, et al. Type II quantum wells on GaSb substrate designed for laser-based gas sensing applications in a broad range of mid infrared [J]. *Optical Materials*, 2012, 34(7): 1107–1111.
- [27] Weih R, Bauer A, Kamp M, et al. Interband cascade lasers with AlGaAsSb bulk cladding layers [J]. *Optical Materials Express*, 2013, 3(10): 1624–1631.
- [28] Tian Z, Hinkey R, Zhao F, et al. Interband cascade lasers with separate–confinement layers[C]//LEOS 2008–, Meeting of the IEEE Lasers and Electro–Optics Society, IEEE, 2008: 749–750.
- [29] Mansour K, Hill C J, Qiu Y, et al. Dual-wavelength interband cascade lasers in mid-infrared spectral region[C]// Lasers and Electro-Optics, 2008 and 2008 Conference on Quantum Electronics and Laser Science. CLEO/QELS 2008. Conference on IET, 2008: 1–2.
- [30] Jiang Y, Li L, Tian Z, et al. Electrically widely tunable interband cascade lasers [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 115(11): 2697–2702.
- [31] Vizbaras A, Dvinelis E, Trinkūnas A, et al. High-performance mid-infrared GaSb laser diodes for defence and sensing applications [C]//SPIE Defense, Sensing and Security, 2014: 90–98.
- [32] Melngailis I. Maser action in InAs diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 1963, 2(9): 176–178.
- [33] Caneau C, Srivastava A K, Dentai A G, et al. Room-temperature GaInAsSb/AlGaAsSb DH injection lasers at 2.2 microns[J]. *Electronics Letters*, 1985, 21(18): 815–817.
- [34] Chiu T H, Tsang W T, Ditzenberger J A, et al. Room - temperature operation of InGaAsSb/AlGaSb double heterostructure lasers near 2.2 μm prepared by molecular beam epitaxy [J]. *Applied Physics Letters*, 1986, 49 (17): 1051–1052.
- [35] Choi H K, Eglash S J. High-power multiple-quantum-well GaInAsSb/AlGaAsSb diode lasers emitting at 2.1 μm with low threshold current density [J]. *Applied Physics Letters*, 1992, 61: 1154–1156.
- [36] Lee H, York P K, Menna R J, et al. Room-temperature 2.78 μm AlGaAsSb/ GaInAsSb quantum-well lasers[J]. *Appl Phys Lett*, 1995, 66: 1942.
- [37] Garbuzov D Z, Martinelli R U, Lee H, et al. 4 W quasi-continuous-wave output power from 2 μm AlGaAsSb/ InGaAsSb single-quantum-well broadened waveguide laser diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 1997, 70(22): 2931–2933.
- [38] Rattunde M, Mermelstein C, Schmitz J, et al. Comprehensive modeling of the electro-optical-thermal behavior of (AlGaIn) (AsSb)–based 2.0 μm diode lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(22): 4085–4087.
- [39] Rattunde M, Schmitz J, Kaufel G, et al. GaSb–based 2.X μm quantum-well diode lasers with low beam divergence and high output power[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88 (8): 2931.
- [40] Kelemen M T, Weber J, Rattunde M, et al. High-power 1.9 μm diode laser arrays with reduced far-field angle [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(4):628–630.
- [41] Kim J G, Shterengas L, Martinelli R U, et al. High-power room-temperature continuous wave operation of 2.7 and 2.8 μm In(Al)GaAsSb/GaSb diode lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(10): 1926–1928.
- [42] Xing Junliang, Zhang Yu, Liao Yongping, et al. Investigation of interfaces in AlSb/InAs/Ga_{0.71}In_{0.29}Sb quantum wells by photoluminescence[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116 (12): 406.
- [43] Xing Junliang, Zhang Yu, Liao Yongping, et al. Room-temperature operation of 2.4 μm InGaAsSb/AlGaAsSb

- quantum-well laser diodes with low-threshold current density [J]. *Chinese Physics Letters*, 2014, 31(5): 69–71.
- [44] Yong Cheng'ao, Zhang Yu, Liao Yongping, et al. 2- μm single longitudinal mode GaSb-based laterally coupled distributed feedback laser with regrowth-free shallow-etched gratings by interference lithography [J]. *Chinese Physics B*, 2016, 25(2): 181–185.
- [45] Liao Yongping, Zhang Yu, Xing Junliang, et al. High power laser diodes of 2 μm AlGaAsSb/InGaSb type I quantum-wells[J]. *Journal of Semiconductors*, 2015, 36(5): 50–53.
- [46] Liao Yongping, Zhang Yu, Xing Junliang, et al. GaSb-based quantum wells 2 μm high power laser diode [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2015, 42(S1): S102006. (in Chinese)
廖永平, 张宇, 邢军亮, 等. 铟化镓基量子阱 2 μm 大功率激光器[J]. *中国激光*, 2015, 42(S1): S102006.
- [47] Peters M, Rossin V, Zucker E. High-power high-efficiency laser diodes at JDSU [C]//High-Power Diode Laser Technology and Applications V, 2007: 1217–1222.
- [48] Rattunde M, Schmitz J, Kaufel G, et al. GaSb-based 2.X μm quantum-well diode lasers with low beam divergence and high output power[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(8): 2931.
- [49] Li Z G, Liu G J, You M H, et al. 2.0 μm room temperature CW operation of InGaAsSb/AlGaAsSb laser with asymmetric waveguide structure[J]. *Laser Physics*, 2009, 19(6): 1230–1233.
- [50] Chen J, Kipshidze G, Shterengas L. Diode lasers with asymmetric waveguide and improved beam properties [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(24): 151.
- [51] Shterengas L, Liang R, Kipshidze G, et al. Cascade type-I quantum well diode lasers emitting 960-mW near 3- μm [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(16): 797–800.
- [52] Hosoda T, Feng T, Shterengas L, et al. High power cascade diode lasers emitting near 2- μm [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(13): 1089.