

## 3~4 $\mu\text{m}$ 锑化物带间级联激光器研究进展(特邀)

张 一<sup>1,2</sup>, 张 宇<sup>1,2</sup>, 杨成奥<sup>1,2</sup>, 谢圣文<sup>1,2</sup>, 邵福会<sup>1,2</sup>, 尚金铭<sup>1,2</sup>, 黄书山<sup>1,2</sup>, 袁 野<sup>1,2</sup>  
徐应强<sup>1,2</sup>, 倪海桥<sup>1,2</sup>, 牛智川<sup>1,2</sup>

- (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:** 3~4  $\mu\text{m}$  波段中红外激光器在工业气体检测、医学医疗和自由空间光通信等诸多领域具有十分重要的应用。目前锑化物半导体带间级联激光器是实现中红外 3~4  $\mu\text{m}$  波段的理想方案。带间级联激光器(Interband Cascade Laser, ICL)可以看做是通过电子和空穴复合产生光子的传统二极管激光器以及通过引入多个级联区来提高电子注入效率的子带间量子级联激光器(Quantum Cascade Laser, QCL)的融合。文中概要介绍了带间级联激光器的基本工作原理, 阐述了国际上主要研究单位包括俄克拉荷马大学、美国海军实验室、德国伍兹堡大学等带间级联激光器的发展历史, 介绍了国内单位包括中国科学院半导体所研制成功带间级联激光器的性能, 分析了该类激光器设计制备技术难点和及性能进一步提升优化的技术方案。

**关键词:** 带间级联激光器; 二类 W 型量子阱; 中红外; GaSb 基

**中图分类号:** TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1003003

## Research progress of 3–4 $\mu\text{m}$ antimonide interband cascade laser(*invited*)

Zhang Yi<sup>1,2</sup>, Zhang Yu<sup>1,2</sup>, Yang Cheng'ao<sup>1,2</sup>, Xie Shengwen<sup>1,2</sup>, Shao Fuhui<sup>1,2</sup>, Shang Jinming<sup>1,2</sup>,  
Huang Shushan<sup>1,2</sup>, Yuan Ye<sup>1,2</sup>, Xu Yingqiang<sup>1,2</sup>, Ni Haiqiao<sup>1,2</sup>, Niu Zhichuan<sup>1,2</sup>

- (1. State Key Laboratory for Superlattices and Microstructures, 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:** The mid-infrared lasers of 3–4  $\mu\text{m}$  can be widely used in industrial gas detection, medical treatment and free space optical communication. At present, the antimonide semiconductor interband cascade laser is an ideal scheme for realizing 3–4  $\mu\text{m}$  in the middle infrared band. The interband cascade laser (ICL) may be considered the hybrid of a conventional diode laser that generates photons via electron–hole recombination, and an intersubband–based quantum cascade laser(QCL) that stacks multiple stages for enhanced current efficiency. This paper gives an overview of the basic working principle of inter–band cascade lasers, and describes the development history of major inter–band cascade lasers, including the University of Oklahoma, the US Naval Laboratory, and the University of Woodsburg. The

收稿日期: 2018–05–07; 修订日期: 2018–06–12

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

作者简介: 张一(1994–), 博士生, 主要从事锑化物半导体激光器方面的研究。Email: zhangyi@semi.ac.cn

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

performance of the interband cascade laser developed by the Institute of Semiconductors of the Chinese Academy of Sciences is also included. By analyzing the difficulties in designing and preparing the laser, the technical solution to further improve the performance of this kind of lasers is expounded.

**Key words:** interband cascade laser; type-II quantum well; mid-infrared; GaSb-based

## 0 引言

3~4  $\mu\text{m}$  中红外波段目前受到越来越大的关注,因为很多气体比如甲烷、二氧化碳、一氧化碳、甲醛等气体的吸收峰都在这个波段,比如甲烷的吸收峰在 3 260 nm、一氧化碳在 4 660 nm、二氧化碳在 4 230 nm,氯化氢气体的吸收峰在 3 400 nm、溴化氢气体的吸收峰在 3 820 nm。目前来看,能够实现 3~4  $\mu\text{m}$  波段的激光器主要有三种:(1) 一类量子阱激光器<sup>[1]</sup>;(2) 一类量子阱级联激光器<sup>[2]</sup>;(3) 二类的带间级联激光器(Interband Cascade Laser, ICL)。其中由于一类量子阱以及一类量子阱级联激光器在 3.3  $\mu\text{m}$  以上的价带限制不足以及随着波长增加俄歇非辐射复合的显著增加,导致其在 3.3  $\mu\text{m}$  以上较难实现,而带间级联激光器刚好可以弥补这些缺点,可以很好的覆盖整个的 3~4  $\mu\text{m}$  波段。ICL 是实现 3~4  $\mu\text{m}$  中红外波段的理想光源,它不仅具备传统量子阱激光器较长的上能级复合寿命的优点,又具备量子级联激光器(Quantum Cascade Laser, QCL)利用电压实现有源区的级联从而实现电子重复利用的优点。这使得可以有效工作于 3~4  $\mu\text{m}$  波段的带间级联激光器在医疗器械、空间光通信、工业气体检测领域有着重要的作用<sup>[3]</sup>。

目前国际上正在研究带间级联激光器的大学和研究所主要有德国伍兹堡大学、俄赫拉荷马大学以及美国海军实验室,以及文中报道的由中国科学院半导体研究所超晶格国家重点实验室本课题组研制的国内第一支的室温连续激光的带间级联激光器。

文中将对带间级联激光器的发展历史,其结构设计及理论基础,关键制备技术进行分析与总结,并对带间级联激光器最新研究进展进行介绍,并对其未来发展方向进行展望。

## 1 带间级联激光器工作原理

对于传统的二极管激光器,多量子阱中是通过

并联来实现载流子注入的,而对于级联激光器来说,比如量子级联激光器与带间级联激光器,多个有源区是通过串联形式实现载流子注入,整个有源区在正向电压下会形成一个能量阶梯,当上一级中的电子跃迁到下能级或者与空穴复合发光之后,通过级联结构可以再注入到下一级中的电子阱中,从而实现电子的重复利用。理想情况下,一个电子能产生的光子数是由级联数  $N$  来决定的,这导致级联结构的量子效率可以大于 1,这种级联结构将会导致其工作电流比等效的并联二极管激光器小  $N_c$  倍,但是相应的其电压将会大幅增加,这种用较高的阈值电压来换取较低的阈值电流的结果是来自寄生电阻的电功率消耗要比并联型的二极管小  $N_c^2$  倍。这导致带间级联激光器具有较高的量子效率,以及较低的阈值电流。

虽然带间级联激光器与量子级联激光器都具有级联的结构,但是由于量子级联激光器是单极型的器件,其电子的输运和复合过程都发生于导带之中,这避免不了快速声子散射的参与。而带间级联激光器由于基于带间跃迁,其发光是在导带中的电子与价带中的空穴中完成的,由于这两个带有相反的色散曲线,电子带间跃迁过程不允许快速声子散射的参与。然而带间级联激光器仍会受到俄歇复合作用的影响,但是由于在中红外光谱(3~5  $\mu\text{m}$ )区域通常而写复合比光学声子散射慢,所以粒子数反转可以很好的在带间级联激光器中形成<sup>[4]</sup>,这使得带间级联激光器不需要和量子级联激光器一样去借助快速声子以及多能级去实现粒子数反转。所以在带间级联激光器中,其阈值电流、电压以及功耗可以显著降低。

带间级联激光器与常规的量子阱激光器的另一个不同是其利用的是二类带间跃迁。对于普通的一类量子阱激光器来说,其电子和空穴波函数都被限制在同一层的材料当中,其跃迁也为一类的直接跃迁。而对于带间级联激光器来说,其电子和空穴不在同一层材料当中,其电子和空穴的波函数也分布在

不同的层,如图 1 所示,其发光波长也自然不是由一种材料的禁带宽度  $E_g=E_c-E_v$  来决定的,而是由二类量子阱中不同层中电子和空穴的基态能量差决定  $E_g=E_c-E_h$ 。

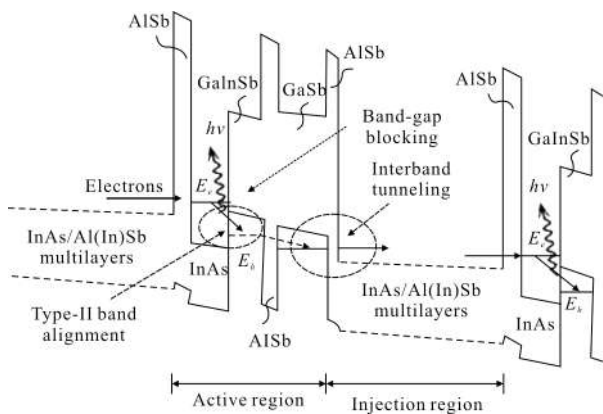


图 1 早期带间级联激光器有源区能带图<sup>[4]</sup>

Fig.1 Band structure of the active region of early time ICL<sup>[4]</sup>

如图 1 所示,其电子波函数主要分布于 InAs 材料中,而空穴的波函数主要分布于 GaInSb 材料中。而相应的发光波长,则主要是由 InAs 空穴阱中的电子基态  $E_e$  与 GaInSb 空穴阱中的空穴基态  $E_h$  的能量差决定的。这种二类量子阱结构的波长可以通过改变简单的改变 InAs 阱层的厚度或者 GaInSb 阱层的厚度来覆盖整个的中红外到远红外的波段。图 1 中两个有源量子阱中间是 GaSb/AlSb 以及 InAs/AlSb 渐变层,这使得在第一个有源区中复合的电子可以从空穴基态  $E_h$  通过带间隧穿到下一级的注入区的导带  $E_c$  中,这使其具有较高的电子利用效率。相比于常规的一类量子阱激光器以及单极型的量子级联激光器,带间级联激光器更像是两者混合的产物,然而,使用二类量子阱的一个很大的问题是,如前文所述,其电子和空穴的波函数不在同一层内,这使得其电子和空穴的波函数交叠较小,导致较低的光增益,而解决这个问题的办法是通过引入一个类似“W”型的二类量子阱<sup>[5]</sup>,如图 2 所示,就是在有源区的另一端额外的加一层 InAs 层,这会使得其波函数的交叠得以加强。

带间级联激光器的另一个显著特征是其具有 InAs/GaSb 材料的二类破隙型能带的半金属源,这有破隙型能带在正向电压下具有特殊的特性。图 2 中,在半金属界面处,在正向电压下, GaSb 中的空穴基

态将会比 InAs 中的电子基态还高,这将会导致 GaSb 空穴基态上的大量电子在正向电压下注入到 InAs 的电子基态上,并在正向电压的作用下,经过电子注入区注入到下一级 W 型有源区的 InAs 电子阱中;而 InAs 中的空穴也将会在正向电压下,注入到 GaSb 的空穴基态中,并在电场的作用下通过空穴注入区注入到 W 型有源区的 GaInSb 空穴阱中。这使得带间级联激光器不同于普通的二极管激光器,它的载流子不是通过 pn 结的电流注入产生的,而是通过在正向电压下, InAs/GaSb 二类破隙型半金属界面由内部产生的。

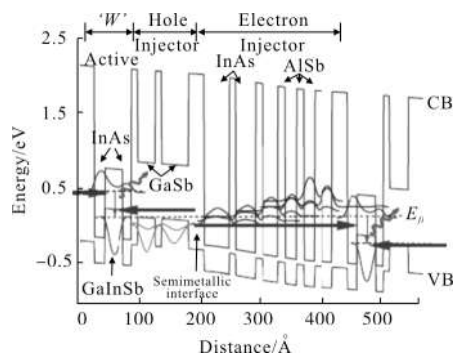


图 2 W 型有源区带间级联激光器有源区能带结构图

Fig.2 Band structure of the "W" active region of ICL

## 2 带间级联激光器技术难点

### 2.1 载流子再平衡

对于常规的带间级联激光器来说,一个级联区包括 W 有源区、电子注入区和空穴注入区。根据美国海军实验室于 2011 年发表的报道中提到,他们利用自洽的准平衡分布模型表明,通过 InAs/GaSb 半金属界面所产生的电子大部分并没有有效的注入到 W 型有源区中的 InAs 量子阱中,而是滞留在了电子注入区,然而空穴反而几乎全部都注入到了 W 型有源区中的 GaInSb 空穴阱中。这使得有源区中空穴的数量远远的超过电子,这对于带间级联激光器的双极型复合非常不利,这导致器件具有的大的阈值电流以及较小的增益。而解决这个问题的办法被称为“载流子再平衡”(Carrier Rebalancing),即在 InAs/AlSb 所组成的电子注入区中进行掺杂,根据 NRL 的研究发现,对电子注入区中的中间 4 个 InAs 进行重掺,其掺杂浓度从以前的  $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  提高到了  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,其结果表明,阈值电流密度降低为原来

的 50%, 在室温下仅为 170 A/cm<sup>2</sup>, 同时输出功率也得到了明显的提升, 其 5 个级联区的窄脊型器件的连续波输出功率达到 158 mW, 是原来的 3 倍。功率转换效率到达 13.5%, 达到当时的最高水平。这种具有载流子再平衡特性的带间级联激光器的功耗被显著的降低, 其室温下最低功耗仅有 30 mW, 其功耗密度比当时最好的量子级联激光器小两个数量级, 这使得带间级联激光器利用这种低能耗的优势可以在一些需要便携和电池供电设备的应用中显得非常的重要。

### 2.2 提高光学限制因子

由于带间级联激光器采用的级联周期数较小, 并且由于其级联区的有效折射率不高, 这将会导致带间级联激光器的光学限制不足。而解决这个问题的办法是在有源区的两端插入分别限制层或者等离子波导。

分别限制层 (Separate Confinement Layers, SCL) 很早就被用在有源区较薄的二极管激光器中, 以此增强载流子和光场的双重限制<sup>[6]</sup>。而在早期的带间级联激光器中, 分别限制层并没有被得到应用, 而在后来的带间级联激光器中, 人们逐渐发现 ICL 需要较少的级联级数就可以达到激射, 这样也能获得更低的工作电压和阈值电流, 并能提高工作温度。但是由于级联级数的较小, 其光学限制因子会显著下降, 这使得光学模式很大的扩散进了限制层中, 为了解决这个问题, 可以在级联区的两端插入 GaSb 的分别限制层。由于 GaSb 的折射率约为 3.8, 其折射率比级联区还要高, 这样波导层 (级联区+分别限制层) 的平均折射率将被显著提高, 而波导包层的折射率相对较低, 这样的结果是提高了波导区与波导包层的折射率差, 这样光就更不容易泄露到波导包层中, 因此对于超晶格包层的厚度要求也会显著降低, 从而有效的降低热阻。具有分别限制层的波导可以获得更高更均匀的光场分布如图 3 所示, 因此, 增加了分别限制层的带间级联激光器可以获得更好的性能。

另外一种解决 ICL 光学限制因子的方法是引入等离子体波导。对于普通的带间级联激光器, 都是生长在 GaSb 衬底上的, 它的波导包层是由 InAs/AlSb 超晶格组成的, 但是由于为了防止光学因子泄露到

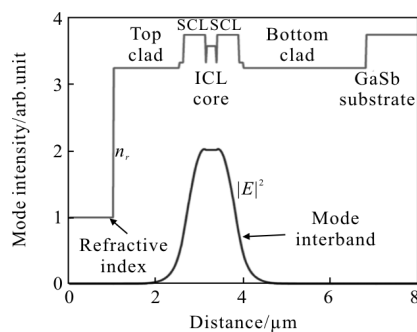


图 3 带间级联激光器光学模式图<sup>[25]</sup>

Fig.3 Optical mode diagram of the interband cascade laser<sup>[25]</sup>

衬底中, 整个波导包层需要长得很厚, 这将会导致需要生长较多对的 InAs/AlSb 超晶格才能够满足要求, 这显然增加了对 MBE 材料生长的要求。并且由于 InAs/AlSb 超晶格本身的热导率不高, 将会影响有源区的散热。解决这个问题的方法就是用 InAs 体材料来代替 InAs/AlSb 超晶格波导包层。由于 InAs 材料在高掺杂下它的折射率会显著的降低, 所以这种方法也成为“等离子波导”<sup>[7]</sup>。等离子波导出了便于生长外, 其高掺杂下的 InAs 波导包层的折射率也比超晶格波导包层小, 并且 InAs 的热导率也更好, 这使其具有一定的优势。具有等离子波导的带间级联激光器一般是生长于 InAs 衬底之上的。

### 3 带间级联激光器研究进展

带间级联激光器的概念是由杨瑞清首次在 1994 年 8 月召开的第七届国际超晶格微结构微器件会议的张贴报告中提出<sup>[8]</sup>。

在 1997 年, 桑迪亚国家实验室和休斯顿大学合作完成了世界上第一只带间级联激光器, 它的级联区有 20 个级联周期, 激射波长在 3.8 μm, 最高脉冲工作温度可达 170 K<sup>[9]</sup>, 但是由于其阈值电流密度太高, 所以并没有工作太长时间, 而且它没有展现出级联的特性, 但是其证实了通过 MBE 是可以实现 ICL 的复杂结构的。

1999 年, 美国陆军实验室 (ARL) 利用 GEN-II MBE 系统研发带间级联激光器, 并逐渐实现连续波工作、高量子效率 (>60%)、峰值功率达到 6 W/facet、以及较高的功率效率 (>14%)<sup>[10-15]</sup>。

2001 年, 第一个波长位于 3.5 μm 的带间级联激光器实现室温脉冲激射, 其阈值电流密度仅为

13 A/cm<sup>2</sup>(80 K)<sup>[16]</sup>。

2002 年,美国喷气推进实验室(JPL)利用 Gen-III MBE 系统研制带间级联激光器。实现低阈值电流密度 80 K 下仅为 8 A/cm<sup>2</sup>,300 K 时为 630 A/cm<sup>2</sup><sup>[17]</sup>。高于室温 350 K 的脉冲工作,连续波工作温度达 237 K<sup>[18]</sup>,激光波长延伸到 5.1~5.6 μm 并且连续波工作达 165 K<sup>[19]</sup>。

在 2006 年,JPL 又实现了 264 K 下的连续波工作,其功耗小于 1.1 W<sup>[20]</sup>。并在之后,成功的研制出了可在 261 K 下工作的单模分布反馈带间级联激光器 DFBI,其波长调谐范围在 245~260 K 可覆盖 3.27 μm 的甲烷吸收谱线<sup>[21]</sup>。在 2007 年交付 NASA 并于 2012 年被安装与好奇号火星车上登陆火星用于甲烷及其同位素的测量。

2008 年,美国海军实验室实现了第一支室温连续激光的带间级联激光器,其连续波最高工作温度可达 319 K,激光波长在 3.7 μm。该激光器具有 5 个级联周期以及 200 nm 的分别限制层<sup>[22]</sup>(见图 4)。

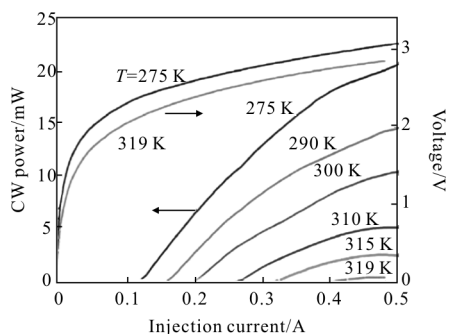


图 4 2008 年,第一支室温连续激光的带间级联激光器的功率-电压-电流关系图

Fig.4 In 2008, the P-V-I of the first RTCW interband cascade laser

2011 年,美国海军实验室(NRL)提出“载流子再平衡”的概念,这一新概念的提出解决了有源区中电子和空穴的数量不均等的问题,通过改变电子注入区中的掺杂浓度,平衡有源区中过高的空穴浓度。通过这个新的概念使得 ICL 实验连续波工作高达 109 °C,激光波长约为 3.9 μm,并且其阈值电流密度降为原来的一半,在 300 K 下仅为 170 A/cm<sup>2</sup>,在 25 °C 时,其 5 个级联周期的窄脊器件连续波输出功率高达 158 mW<sup>[23]</sup>,是之前的 3 倍,功率转化效率高达 13.5。这与当时已报道的最好的量子级联激光

器相比功率密度小了两个数量级,在 25 °C 下其最低的功耗仅有 30 mW,如图 5 所示。

2013 年,德国伍兹堡大学在“载流子再平衡”的基础上,其重新设计了带间级联激光器的过渡区,最终具有 10 个级联周期的激光器室温下阈值电流密度低至 98 A/cm<sup>2</sup><sup>[24]</sup>,这一数据比最好的量子级联激光器要低一个数量级。

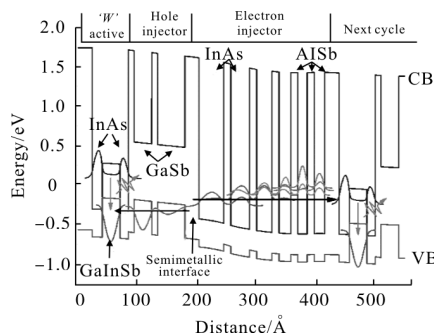


图 5 “载流子在平衡”能带图

Fig.5 Band diagrams of "carrier rebalancing"

2014 年,美国海军实验室实现了 592 mW 的室温大功率连续输出的带间级联激光器,它通过增加有源区的级联数以及分别限制层的厚度来提高输出功率,其采用窄条(32.4 μm×3 mm)斜率效率高达 815 mW/A<sup>[25]</sup>。这个功率目前仍然是带间级联激光器的室温连续最高输出功率,如图 6 所示。

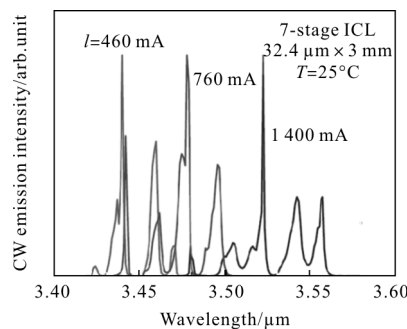


图 6 2014 年,7 个级联区带间级联激光器光谱图<sup>[25]</sup>

Fig.6 In 2014, the spectrum of the 7-stage interband cascade laser<sup>[25]</sup>

2018 年 5 月中国科学院半导体研究所超晶格国家重点实验室的课题组采用分子束外延 (MBE) 在 GaSb 衬底上生长了带间级联激光器,制备出的窄条器件已经实现了室温连续激光,窄脊器件的脊宽为 25 μm,腔长 3 mm。其 5 个级联区的带间级联激光器的激光波长在 3 452.3 nm,如图 7、8 所示,阈值电

流 0.2、0.6 A 下其最大室温连续输出功率为 41.4 mW (未镀膜)。

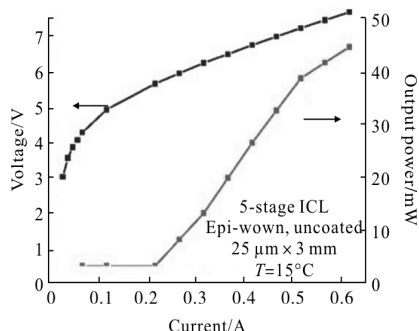


图 7 带间级联激光器电流-电压-功率图

Fig.7 I-V-P of interband cascade laser

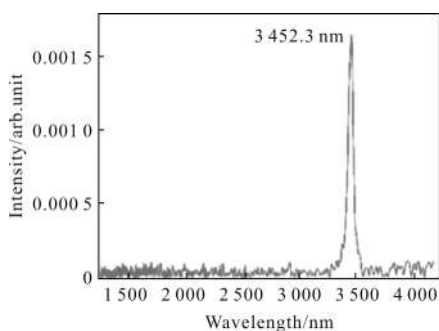


图 8 带间级联激光器室温连续激光光谱图

Fig.8 Continuous wave lasing spectrogram of interband cascade laser at room temperature

#### 4 结束语

目前来看, 铋化物带间级联激光器的研究目前还在初步阶段, 由于本身带间级联激光器在能带设计上就有比较大的难度再加上本身 MBE 材料生长上的困难, 笔者课题组还需要进行更多的研究工作。目前来看铋化物带间级联激光器的主要困难在如下: 第一, 在能带设计上, 由于带间级联激光器采用的是级联结构, 如何通过能带的设计使得级联结构可以发挥作用是其根本所在; 第二, 在材料生长上, 由于带间级联激光器的结构较为复杂, 生长过程中各个源的阀门需要进行上千次的开关闭合, 这给 MBE 系统本身以及材料生长上施加了很大的困难; 第三, 在工艺制备上, 由于铋化物激光器本身的工艺技术的成熟, 使得带间级联激光器的制备更加受限, 其制备工艺还有很大的提升空间; 第四, 热效应下, 由于带间级联激光器采用的 InAs/AlSb 超

晶格作为波导包层, 此材料体系的热导率较低再加上本身 GaSb 材料的低热导率, 这需要进行进一步的优化和改善器件的结构, 是的级联区产生的热量可以及时的传导出, 以此来进一步地改善器件的性能。

目前, 国际上带间级联激光器已经可以实现室温连续激射 500 mW 以上的室温连续输出, 而国内仍然还处于起步阶段, 相信随着科研工作的进一步开展, 带间级联激光器将会取得更大的进步, 并逐渐进入市场, 满足国内工业、民用等需求。

#### 参考文献:

- [1] Grau M, Lin C, Dier O, et al. Room-temperature operation of 3.26  $\mu\text{m}$  GaSb-based type-I lasers with quaternary AlGaInAsSb barriers [J]. *Appl Phys Lett*, 2005, 87(24): 241104.
- [2] Leon Shterengas, Rui Liang, Gela Kipshidze, et al. Type-I quantum well cascade diode lasers emitting near 3  $\mu\text{m}$  [J]. *Appl Phys Lett*, 2013, 103(12): 121108.
- [3] Gaimard Q, Nguyen-Ba T, Larrue A, et al. Distributed-feedback GaSb-based laser diodes in the 2.3 to 3.3  $\mu\text{m}$  wavelength range [J]. *Semiconductor Lasers and Laser Dynamics Vi*, 2014, 9134: 2052115.
- [4] Yang R Q, Pei S S J. Novel type-II quantum cascade lasers [J]. *J Appl Phys*, 1996, 79(11): 8197-8203.
- [5] Meyer J R, Ho-man C A, Bartoli F J, et al. Type-II quantum-well lasers for the mid-wavelength infrared [J]. *Appl Phys Lett*, 1995, 67(6): 757-759.
- [6] Thompson G H B, Kirkby P. (GaAl)As lasers with a heterostructure for optical confinement and additional heterojunctions for extreme carrier confinement [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1973, 9(2): 311-318.
- [7] Sirtori C, Faist J, Capasso F, et al. Quantum cascade laser with plasmon-enhanced waveguide operating at 8.4  $\mu\text{m}$  wavelength [J]. *Appl Phys Lett*, 1995, 66(24): 3242-3244.
- [8] Yang R Q. Infrared laser based on intersubband transitions in quantum wells [J]. *Superlattice and Microdevices*, 1995, 17(1): 1017.
- [9] Lin Chih-Hsiang, Yang Q, Zhang D, et al. Type II interband quantum cascade laser at 3.8  $\mu\text{m}$  [J]. *Electronics Letters*, 2015, 33(7): 598-599.
- [10] Yang R Q, Bruno J D, Bradshaw J L, et al. High-power

- interband cascade lasers with quantum efficiency >45% [J]. *Electronics Letters*, 1999, 35(15): 1254–1255.
- [11] Bradshaw J L, Yang R Q, Bruno J D, et al. High-efficiency interband cascade lasers with peak power exceeding 4 W/facet [J]. *Appl Phys Lett*, 1999, 75(16): 2362–2364.
- [12] Bradshaw J L, Bruno J D, Pham J T, et al. Continuous wave operation of type-II interband cascade lasers[J]. *IEEE Proc Optoelectron*, 2000, 147: 177–180.
- [13] Bruno J D, Bradshaw J L, Yang R Q, et al. Low-threshold interband cascade lasers with power efficiency exceeding 9%[J]. *Appl Phys Lett*, 2000, 76(22): 3167–3169.
- [14] Bradshaw J L, Pham J T, Yang R Q, et al. Enhanced CW performance of the interband cascade laser using improved device fabrication [J]. *IEEE J Select Top Quantum Electron*, 2001, 37(2): 102–105.
- [15] Yang R Q, Bradshaw J L, Bruno J D, et al. Power, efficiency, and thermal characteristics of type -II interband cascade lasers [J]. *IEEE J Select Top Quantum Electron*, 2001, 37(2): 282–289.
- [16] Yang R Q, Bradshaw J L, Bruno J D, et al. Room temperature type -II interband cascade laser [J]. *Appl Phys Lett*, 2002, 81(3): 397–399.
- [17] Yang R Q, Hill C J, Christensen L E, et al. Mid-IR type-II interband cascade lasers and their applications [C]//Proc of SPIE, 2005, 5624: 413–422.
- [18] Yang R Q, Hill C J, Yang B H. High-temperature and low-threshold midinfrared interband cascade lasers [J]. *Appl Phys Lett*, 2005, 87(15): 151109.
- [19] Hill C J, Yang R Q. MBE growth optimization of Sb-based interband cascade lasers [J]. *J Cryst Growth*, 2005, 278(1): 167–172.
- [20] Mansour K, Qiu Y, Hill C J, et al. Mid-infrared interband cascade lasers at thermoelectric cooler temperatures[J]. *Electron Lett*, 2006, 42(18): 1034–1035.
- [21] Yang R Q, Hill C J, Mansour K, et al. Distributed feedback mid-IR interband cascade lasers at thermoelectric cooler temperatures [J]. *IEEE J Select Top Quantum Electron*, 2007, 13(5): 1074–1078.
- [22] Kim M, Canedy C L, Bewley W W, et al. Interband cascade laser emitting at 3.75 in continuous wave above room temperature [J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 92(19): 191110.
- [23] Vurgaftman I, Bewley W W, Canedy C L, et al. Rebalancing of internally generated carriers for mid-infrared interband cascade lasers with very low power consumption [J]. *Nature Communications*, 2011, 2(1): 1585–1595.
- [24] Robert Weih, Martin Kamp, Sven Höfling, et al. Interband cascade lasers with room temperature threshold current densities below 100 A/cm<sup>2</sup> [J]. *Appl Phys Lett*, 2013, 102(23): 231123.
- [25] Bewley W W, Kim C S, Canedy C L, et al. High-power CW performance of 7-stage interband cascade lasers [J]. *Opt Express*, 2014, 22(7): 7702–7710.