

引用格式: NING Chao, SUN Ruixuan, YU Tian, et al. Optimization of Electron Injectors for Interband Cascade Lasers (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(2):0251208

宁超,孙瑞轩,于天,等.带间级联激光器电子注入区优化研究(特邀)[J].光子学报,2022,51(2):0251208

带间级联激光器电子注入区优化研究(特邀)

宁超^{1,2},孙瑞轩^{1,2},于天^{1,2},刘舒曼^{1,2},张锦川^{1,2},卓宁^{1,2},王利军^{1,2},
刘俊岐^{1,2},翟慎强^{1,2},李远¹,刘峰奇^{1,2,3}

(1 中国科学院半导体研究所 半导体材料科学重点实验室,北京 100083)

(2 中国科学院大学 材料与光电研究中心,北京 100049)

(3 北京量子信息科学研究院,北京 100193)

摘 要:带间级联激光器有源区内部的物理机制复杂,尚未得到充分研究。优化了电子注入区结构,通过减小 InAs/AlSb 啁啾超晶格中 InAs 量子阱的厚度促进电子向光增益区的注入,在较低电子注入区掺杂浓度下满足了光增益区电子数和空穴数基本相等的注入平衡条件,降低了有源区中自由载流子吸收和杂质散射造成的光损耗。采用该有源区结构的带间级联激光器实现了较好的室温激射性能,腔长 4 mm、脊宽 20 μm 且腔面未镀膜器件的阈值电流为 200 mA,单腔面出光功率为 55 mW。通过分析 2~5 mm 不同腔长器件的电压-电流-光功率性能,得到器件的波导损耗仅为 3 cm^{-1} ,有源区载流子寿命为 0.7 ns。

关键词:半导体激光器;中红外;分子束外延;带间级联激光器;量子阱;铋化物

中图分类号:TN248.4

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225102.0251208

0 引言

带间级联激光器(Interband Cascade Lasers, ICLs)得益于其极低的阈值电流和体积小等优点,在痕量气体检测^[1-4]、中波红外光频梳^[5-7]和自由空间光通信^[8]领域具有重要的应用价值。自杨瑞青教授在 1994 年首次提出带间级联的概念后^[9],人们不断地对有源区结构和波导结构的设计进行改善。1996 年,美国的 MEYER JR 等将 GaSb/AlSb 量子阱(Quantum Wells, QWs)构成的空穴注入区引入 ICL 有源区设计中^[10],以阻止电子从光学增益区直接隧穿到电子注入区。随后,为了提高跃迁矩阵元并抑制俄歇复合效应,他们采用了应变 W 型二类量子阱结构^[11,12]作为光增益区。随着材料的外延质量和工艺水平的提升,ICL 性能稳步提高^[12-15]。2008~2011 年间,美国海军实验室成功实现了 ICL 的室温连续波工作(Continuous Wave, CW)^[16],并提出载流子再平衡设计^[15],进一步降低了器件阈值电流。他们指出在早期的有源区设计中,由于在光增益区中空穴数量是电子数量的 5 倍,因此 PPN 型俄歇复合过程占主导。在载流子再平衡设计中,有源区中电子注入区的掺杂浓度提高到 $5.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$,理论计算表明高掺杂后光增益区中电子和空穴数量近似相等,制备出的器件的阈值电流密度比早期器件降低了一半。但是在激光器有源区中重掺杂会造成严重的自由载流子吸收,因而会增加光学损耗。

本文设计并实现了一种新型的有源区结构,首先降低有源区中 n 型掺杂的浓度,以降低光损耗,同时,通过减小电子注入区中量子阱的厚度来提高电子注入效率,达到光增益区中注入电子和空穴数量平衡的要求。为了验证该设计能否有效地平衡光增益区的电子和空穴数量,制作了具有薄电子注入区和厚电子注入区两种不同有源区结构的激光器,通过器件性能表征和腔长分析得到这两个激光器的阈值电流密度、外量

基金项目:国家重点研究发展计划(No. 2018YFB2200500),国家自然科学基金(Nos. 61790583, 61774150, 61774151),中科院先导专项(No. XDB43000000)

第一作者:宁超(1995—),男,博士研究生,主要研究方向为带间级联激光器。Email: ningchao@semi.ac.cn

导师(通讯作者):刘舒曼(1973—),女,研究员,博士,主要研究方向为低维半导体结构材料生长与器件。Email: liusm@semi.ac.cn

收稿日期:2021-11-01; **录用日期:**2022-01-02

<http://www.photon.ac.cn>

子效率、内量子效率、波导损耗、模式增益系数等性能参数,比较可知采用薄电子注入区器件波导损耗更低,达到了预期的设计目标。

1 有源区能带结构

ICL有源区的能带结构如图1(a),包含三个部分:光增益区(active QWs)、电子注入区(electron injector)和空穴注入区(hole injector)。电子注入区和空穴注入区之间是GaSb和InAs形成的二类异质结构,在一定的外电场下InAs的最低电子子带和GaSb的最高空穴子带对齐,得到半金属界面(semimetallic interface),实现载流子的共振隧穿输运。光增益区中发生带间跃迁,载流子寿命(ns量级)大于注入区电子在子带间中输运时间(ps量级),因此,光增益区的下能级、空穴注入区子带、电子注入区子带以及下一个级联的光增益区的上能级具有共同的准费米能级 E_{Fi} 。再平衡设计之前的传统ICL有源区中,电子注入区通常采用中等掺杂。此外,为了在较低的外加偏压下形成半金属界面,电子注入区左侧三个量子阱较厚,一个周期中电子注入区长度占有源区一半以上,离化的电子大多停留在前三个较宽的量子阱中,而空穴注入区的离化空穴几乎全部注入光增益区,因而注入到光增益区中空穴数量远大于电子数量,也就是电子和空穴数量不平衡。这导致了两方面的问题:一方面,因PPN型俄歇复合速率正比于空穴密度的平方,大量过剩空穴有助于俄歇复合,造成载流子寿命降低,光增益区粒子数反转需要的注入电流随之提高;另一方面,空穴的自由载流子吸收截面较大^[18-19],造成较大光吸收损耗。

载流子再平衡设计的核心是通过大幅度提高电子注入区中n型掺杂的浓度来提高注入到增益区中电子的数量,从而提高电子-空穴辐射复合的效率,但是掺杂浓度太高造成电子注入区中积累大量的自由电子,这些自由电子容易吸收增益区中的红外光子,造成光损耗。此外,高掺杂引入的杂质散射也会造成额外的损耗,这两种损耗会提高激光器的阈值增益,影响器件性能。

为了减少高掺杂造成的损耗,本工作降低了电子注入区中的掺杂浓度,并缩短了电子注入区长度。所设计的有源区结构为2.5 nm AlSb/1.8 nm InAs/3.0 nm $\text{Ga}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{Sb}$ /1.5 nm InAs/1.0 nm AlSb/3.0 nm GaSb/1.0 nm AlSb/4.5 nm GaSb/2.0 nm AlSb/3.4 nm InAs/1.2 nm AlSb/3.0 nm InAs/1.2 nm AlSb/2.6 nm InAs/1.2 nm AlSb/2.1 nm InAs/1.2 nm AlSb/1.8 nm InAs/1.2 nm AlSb/1.8 nm InAs,其中带有下划线的层中掺杂浓度为 $2.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。图1(b)是理论计算得到的电子和空穴浓度分布,在光增益区内电子和空穴数量分别为 $1.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 和 $1.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$,满足载流子平衡的要求。

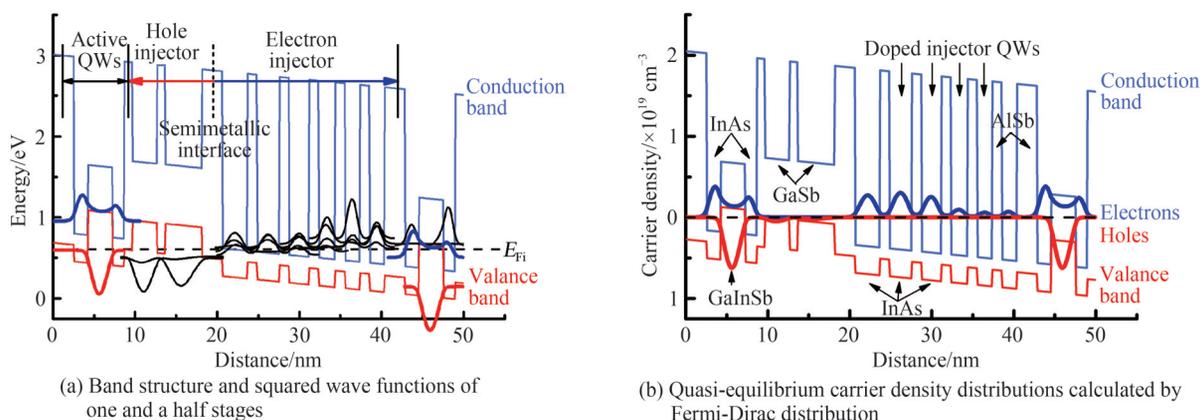


图1 有源区的能带图及载流子分布

Fig. 1 Band structure of the active region and carrier distributions

2 外延及工艺

激光器样品S1采用如图1(a)的有源区结构,对比样品S2的有源区与文献[17]中类似,其光增益区中GaInSb层的In组分为0.35,高于样品S1的0.3,电子注入区比S1样品厚,掺杂浓度与S1相同。两个样品均在n型GaSb衬底(001)上通过分子束外延系统生长。首先生长500 nm高掺的n型GaSb层作为缓冲层,掺杂浓度为 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,在上面生长3 μm 的InAs/AlSb(2.4 nm/2.4 nm)超晶格作为下波导包层,然后生

长 200 nm 的 GaSb 下分别限制层,随后继续生长 5 个周期的有源区,在有源区上面生长 200 nm 的 GaSb 上分别限制层和 1.5 μm 的 InAs/AlSb (2.4 nm / 2.4 nm) 超晶格上波导包层,最后覆盖 20 nm 重掺杂 InAs 盖层。3 μm 的超晶格下波导包层用于阻挡光学模式泄露到具有高折射率的 GaSb 缓冲层,减少光学损耗。波导层中进行梯度掺杂,靠近有源区的部分掺杂浓度低,远离的部分掺杂浓度高,以降低靠近有源区部分的光学损耗。此外,高折射率的 GaSb 分别限制层能够有效提高有源区和波导包层的折射率差,将光学模式限制在有源区附近,以增加光学增益。由于分别限制层靠近有源区,所以该层掺杂浓度尽可能低,避免自由载流子损耗。在激光器全结构中,各层之间插入具有渐变厚度的 InAs/AlSb 啁啾超晶格,以消除界面处导带能级的突变,提高电压利用效率。

外延结束后,用脊波导工艺制作法布里-珀罗腔(Fabry-Perot, FP)器件。首先,通过接触式光刻和湿法腐蚀($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7:\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$)工艺形成脊形波导,湿法腐蚀需越过有源区到下分别限制层中,以消除有源区中载流子的横向扩散。采用等离子增强化学气相沉积设备生长 450 nm 厚的 SiO_2 薄膜作为绝缘层,并用氢氟酸缓冲液在脊形条的顶部打开电注入窗口。稀盐酸处理表面后,采用电子束蒸发设备沉积 Ti/Pt/Au 作为上接触层,在上面电镀 5 μm 以上的 Au 层以提高器件热扩散,然后将衬底减薄到 120 μm ,沉积 Ge/Au/Pt/Au 并退火形成下接触层,最后解理成单个器件,利用钢金合金将管芯倒焊在热沉上。

3 结果及讨论

对 S1、S2 两个外延片制备出的器件进行性能表征,器件的腔长为 4 mm,脊宽为 20 μm ,解理腔面上无镀膜。在相同温度下以 CW 模式进行光功率-电流-电压(Light-Current-Voltage, $L-I-V$)特性的测试,功率计探头收集效率约 90%,测试数据没有进行相应的修正。用带有水循环散热的二级制冷系统对激光器热沉的温度进行控制,热沉温度的波动可控制在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内。图 2 为这两个器件在不同热沉温度下的 CW $L-I-V$ 性能曲线,实线为 S1 样品,虚线为 S2 样品。

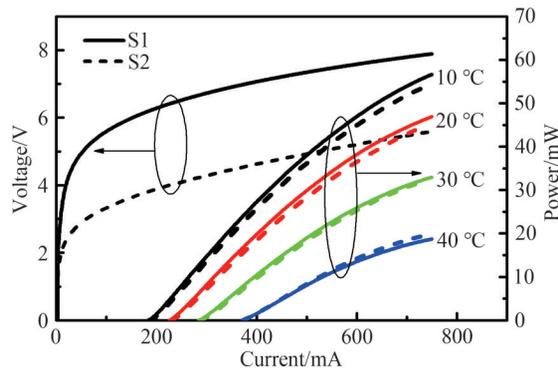


图 2 腔长 4 mm、脊宽 20 μm 器件 CW 工作的 $L-I-V$ 特性
Fig. 2 The CW $L-I-V$ characteristics for the 20- μm -wide and 4-mm-long devices

从图中看到, S1 的开启电压(5.7 V)高于 S2 的开启电压(3.4 V)。ICL 的开启电压 $V_{\text{turn-on}}$ 主要受一个周期中的压降 V_0 、周期数 N 以及由串联电阻 ρ 导致的额外压降 V_{ex} 影响,表示为 $V_{\text{turn-on}} = N \cdot V_0 + V_{\text{ex}}$ 。两个样品有源区以外的结构完全相同,即 V_{ex} 相同,因此导致开启电压差异的主要原因是压降 V_0 不同。有源区中的主要差异来源于电子注入区,图 3 比较了不同偏压下半金属界面附近的能带结构,蓝色为电子波函数,红色为空穴波函数。图 3(a)为样品 S1,电子注入区中靠近半金属界面的三个 InAs 阱的厚度,分别为 3.0、2.7、2.4 nm,图 3(b)为样品 S2,相应的三个 InAs 阱厚度分别为 4.2、3.2、2.5 nm。ICL 的工作原理要求开启电压下电子在半金属界面处从空穴注入区共振隧穿到电子注入区,实现的必要条件是电子注入区的基态能级位置与空穴注入区的能级在一定偏压下对齐,满足共振隧穿的条件,即形成半金属界面。样品 S1 的 InAs 阱更薄,故基态能级位置更高,两个样品的空穴注入区子带能级位置相同,因此 S1 结构中需要更高的外加电场才能实现共振隧穿。通过计算可知,样品 S1 和 S2 分别在 170 KV/cm 和 85 KV/cm 的外电场下形成半金属界面,另外,考虑有源区两侧过渡区的压降,推测样品 S1 和 S2 的开启电压有 2 V 的差别,与实验得到的差值

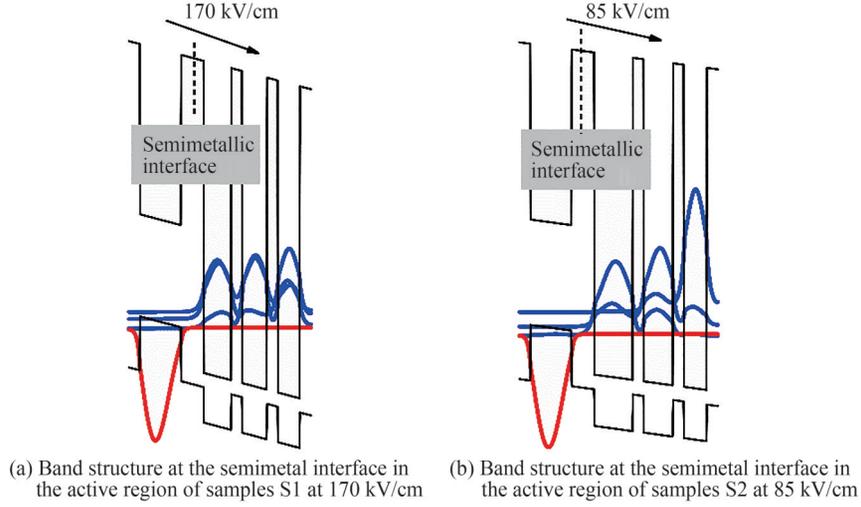


图3 半金属界面处附近的能带结构

Fig. 3 Band structure near the semimetal interface in the active region

2.3 V 相符合。

图2中的 $L-I$ 曲线表明两个激光器的阈值电流和斜率效率基本相同, $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 阈值电流为 200 mA , 注入电流为 750 mA 时单面输出光功率为 55 mW 。为了进一步分析激光器的性能, 在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的热沉温度下测量了不同腔长器件的 $L-I-V$ 特性曲线, 这些器件的腔面均未镀膜。各器件的 $L-I-V$ 特性曲线给出外量子效率 η_{ext} 和阈值电流密度 J_{th} , 根据半导体激光器变腔长分析理论, 由速率方程给出阈值电流密度与外量子效率和腔长的关系^[20]

$$\frac{1}{\eta_{\text{ext}}} = \frac{1}{\eta_i} + \frac{2\alpha_w}{\eta_i} \ln(R_1 R_2) L \quad (1)$$

$$J_{\text{th}} = \frac{q_e d_a}{\eta_i \tau} \left(\frac{1}{\Gamma a} \left(\alpha_w + \frac{1}{2L} \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right) \right) + n_{\text{tr}} \right) = J_{\text{tr}} + \frac{\alpha_w}{G} + \frac{1}{2GL} \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right) \quad (2)$$

式中, η_i 为内量子效率, α_w 为波导损耗, L 为腔长, R_1 和 R_2 分别为两个腔面的反射率, 这里取 31% , q_e 和 d_a 分别为电子电荷量和有源区厚度, τ 为载流子寿命, Γ 为有源区的光限制因子, 取 16% , a 为微分增益系数, n_{tr} 和 J_{tr} 分别为透明载流子浓度和透明电流密度, G 为模式增益系数, 表示为

$$G = \frac{\Gamma a \eta_i \tau}{q_e d_a} \quad (3)$$

由式(1)可知外量子效率的倒数和腔长呈线性关系, 式(2)则表明阈值电流密度和腔长的倒数为线性关系。图4给出四个器件的外量子效率的倒数与腔长的关系, 图5是阈值电流密度与腔长倒数的关系, 其中红色方块为样品S1的数据, 其对应的线性拟合用实线表示, 黑色空心圆为样品S2的数据, 对应的线性拟合用

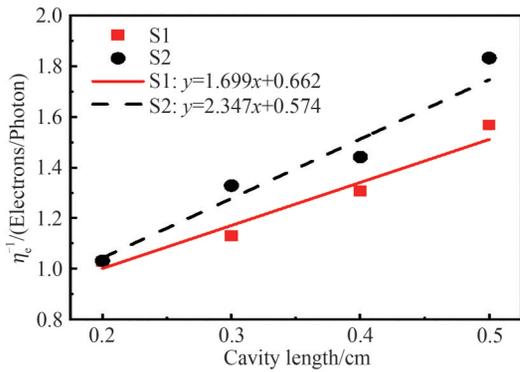


图4 外量子效率和腔长的关系

Fig. 4 Relationship between external quantum efficiency and cavity length

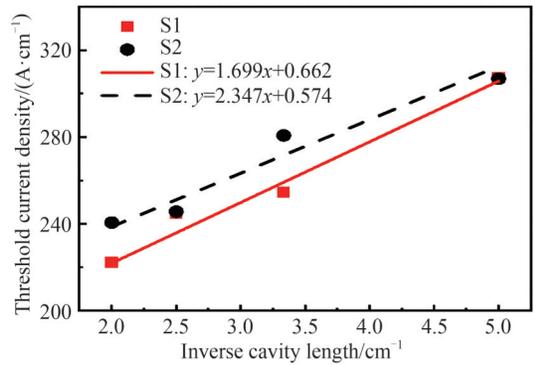


图5 阈值电流密度和腔长的关系

Fig. 5 Relationship between threshold current density and cavity length

虚线给出。根据式(1)和(2),利用线性拟合得到斜率和截距,计算出器件的内量子效率、波导损耗、模式增益系数、透明电流密度和载流子寿命,计算中所用的微分增益系数为 $a = 7.9 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$,取自文献中 ICL 动态测量的结果^[21],计算结果如表 1。

表 1 腔长分析得到的 ICL 器件性能参数
Table 1 ICL performance parameters obtained by cavity length analysis

Parameter	S1	S2
Internal quantum efficiency η_i	1.51	1.74
Waveguide loss α_w/cm^{-1}	3.01	4.79
Mode gain coefficient $G/(\text{cm}\cdot\text{A}^{-1})$	0.042	0.048
Transparent current density $J_{tr}/(\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	94.03	88.52
Carrier lifetime τ/ns	0.71	0.70

从表中的数据看出,样品 S2 的波导损耗明显高于 S1,而两个样品的掺杂浓度和结构均相同,唯一的区别是电子注入区不同。根据理论计算,载流子平衡时,S1 中光增益区里电子和空穴的数量相当,而 S2 光增益区里空穴数量高于电子数量,在半导体激光器中,空穴的吸收截面高于电子,对波导损耗的贡献占主要作用,因此 S2 的增益区中过剩空穴导致更严重的自由载流子吸收,使其表现出更高的波导损耗。值得一提的是,两个样品的载流子寿命基本相同,约为 0.7 ns,该值与美国海军实验室的结果相近^[22]。半导体激光器中载流子寿命主要受三个因素影响:自发辐射复合速率、自发非辐射复合速率和俄歇非辐射复合速率,其中,俄歇复合速率随波长的增加而增大,ICL 工作波段位于中红外,故俄歇复合过程在 ICL 中占主导作用。根据载流子再平衡设计理论,空穴数量和电子数量相当时,俄歇过程能得到有效抑制,从而提高载流子寿命,因此理论上样品 S1 中实现了电子和空穴注入平衡,载流子寿命应该更长。但是,通过测试和拟合得到 S1 结构与 S2 结构的载流子寿命接近,推测有两方面的原因:一方面,样品 S1 的增益区中 GaInSb 层的 In 组分为 0.3,而样品 S2 中 GaInSb 层的 In 组分为 0.35,所以样品 S2 增益区量子阱的应变更大,在大应变作用下,价带的轻重空穴带分离,对俄歇复合过程有一定的抑制作用;另一方面样品 S1 需要较高的偏压形成半金属界面,因此功耗较高,有源区实际温度应高于样品 S2,高温下俄歇复合更严重,降低了载流子寿命。样品 S1 中载流子平衡抑制了俄歇复合,但低应变量子阱的轻重空穴带耦合有利于俄歇复合,在两种效应共同作用下,虽然波导损耗明显降低,但是载流子寿命、阈值电流密度、输出功率等方面没有明显的改善,为此,后续工作中拟将 S1 结构中增益区 GaInSb 层的 In 组分提高到 0.35,保持 S1 器件低波导损耗优势的同时,利用量子阱应变进一步降低俄歇复合几率,提高增益区载流子寿命,从而提升器件性能。

4 结论

本文设计了新型的 ICL 电子注入区,降低了电子注入区中 InAs 阱的厚度,提高了最低的电子子带能级,使电子更容易注入到光增益区,从而将载流子再平衡所需的掺杂浓度降低到 $2.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。实验上,采用分子束外延方法生长了 ICL 结构,制作了具有脊波导的 FP 腔激光器,腔面未镀膜的器件 ($4 \text{ mm} \times 20 \mu\text{m}$) 10°C 时阈值电流为 200 mA,单面光输出功率达到 55 mW,变腔长器件分析给出波导损耗低至 3 cm^{-1} ,证明设计的薄电子注入区能够提高有源区中电子注入效率,从而在较低的掺杂浓度下实现光增益区中载流子再平衡,降低了自由载流子吸收造成的波导损耗。进一步提高增益区 GaInSb QW 的应变,应该能够抑制俄歇复合,降低阈值电流密度,从而提高器件的性能。

参考文献

- [1] SAMPAPLO A, CSUTAK S, PATIMISCO P, et al. Methane, ethane and propane detection using a compact quartz enhanced photoacoustic sensor and a single interband cascade laser[J]. Sensors and Actuators, B: Chemical, 2019, 282(5): 952-960.
- [2] ZHENG Huadan, LIU Yihua, LIN Haoyang, et al. Sub-ppb-level CH_4 detection by exploiting a low-noise differential photoacoustic resonator with a room-temperature interband cascade laser[J]. Optics Express, 2020, 28(13): 19446-19456.
- [3] LI N, TAO L, YI H, et al. Methane detection using an interband-cascade LED coupled to a hollow-core fiber[J]. Optics Express, 2021, 29(5): 7221-7231.

- [4] CHEN Wenwen, ZHENG Kaiyuan, CAO Yanwei, et al. Sensing system of dissolved methane in water based on cavity-enhanced laser spectroscopy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(9):0930002.
陈稳稳,郑凯元,曹延伟,等. 基于腔增强激光光谱的水中溶解甲烷传感系统[J]. *光子学报*, 2021, 50(9):0930002.
- [5] SCHWARZ B, HILLBRAND J, BEISER M, et al. Monolithic frequency comb platform based on interband cascade lasers and detectors[J]. *Optica*, 2019, 6(7): 890-895.
- [6] STERCZEWSKI L A, BAGHERI M, FREZ C, et al. Mid-infrared dual-comb spectroscopy with room-temperature bifunctional interband cascade lasers and detectors[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(14):141102.
- [7] O' HAGAN S, NORTHERN J, GRAS B, et al. Multi-species sensing using multi-mode absorption spectroscopy with mid-infrared interband cascade lasers[J]. *Applied Physics B*, 2016, 122:173.
- [8] GAO Duorui, XIE Zhuang, MA Rong, et al. Development current status and trend analysis of satellite laser communication (invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(4):0406001.
高铎瑞,谢壮,马榕等,卫星激光通信发展现状与趋势分析(特邀)[J]. *光子学报*, 2021, 50(4):0406001.
- [9] YANG R Q. Infrared laser based on intersubband transitions in quantum wells[J]. *Superlattices and Microstructures*, 1995, 17(1): 77-83.
- [10] MEYER J R, VURGAFTMAN I, YANG R Q, et al. Type-II and type-I interband cascade lasers [J]. *Electronics Letters*, 1996, 32(1): 45-46.
- [11] FELIX C L, BEWLEY W W, VURGAFTMAN I, et al. Interband cascade laser emitting >1 photon per injected electron[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, 9(11): 1433-1435.
- [12] FELIX C L, BEWLEY W W, AIFER E H, et al. Low threshold $3\ \mu\text{m}$ interband cascade "W" laser[J]. *Journal of Electronic Materials*, 1998, 27(2): 77-80.
- [13] OLAFSEN L J, AIFER E H, VURGAFTMAN I, et al. Near-room-temperature mid-infrared interband cascade laser [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 72(19): 2370 - 2372.
- [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 Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 2001, 7(2): 102-105.
- [15] 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.
- [16] KIM M, CANEDY C L, BEWLEY W W, et al. Interband cascade laser emitting at $\lambda=3.75\ \mu\text{m}$ in continuous wave above room temperature[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(19): 10-13.
- [17] 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): 585-587.
- [18] CRUMP P, ERBERT G, WENENZEL H, et al. Efficient high-power laser diodes[J]. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(4):1501211.
- [19] LIANG Song. InP based long wavelength transistor lasers (Invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(11):1149008.
梁松, InP 基长波长晶体管激光器(特邀)[J]. *光子学报*, 2020, 49(11):1149008.
- [20] DENG Yu, WANG Cheng. Rate equation modeling of interband cascade lasers on modulation and noise dynamics [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2020, 56(2): 1-9.
- [21] FAN Zhuofei, DENG Yu, NING Chao, et al. Differential gain and gain compression of an overdamped interband cascade laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 119(8):081101.
- [22] BEWLEY W W, LINDLE J R, KIM C S, et al. Lifetimes and Auger coefficients in type-II W interband cascade lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(4): 226-229.

Optimization of Electron Injectors for Interband Cascade Lasers (Invited)

NING Chao^{1,2}, SUN Ruixuan^{1,2}, YU Tian^{1,2}, LIU Shuman^{1,2}, ZHANG Jinchuan^{1,2},
ZHUO Ning^{1,2}, WANG Lijun^{1,2}, LIU Junqi^{1,2}, ZHAI Shenqiang^{1,2}, LI Yuan¹, LIU Fengqi^{1,2,3}
(1 Key Laboratory of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100083, China)
(2 Center of Materials Science and Opto-electronic Engineering, University of Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100049, China)
(3 Beijing Academy of Quantum Information Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: The Interband Cascade Laser (ICL) is a mid-infrared laser source with a low threshold current

density, which has been used widely in hydrocarbon detection and other gases. One active region stage of an ICL consists of an InAs/GaInSb/InAs W Quantum Well (QW) emitter, GaSb/AlSb QW hole injector and InAs/AlSb chirped superlattice electron injector. In contrast to the intersubband electron transition and transportation in quantum cascade lasers, interband transitions and carrier transportation from valance band to conduction band through a semimetallic interface are involved in an ICL. As the electron injector is longer than the hole injector, most ionized electrons are located in the lower subbands away from the emitter, and the efficiency of electron injection into the emitter is lower than that of holes, resulting in a large number of excess holes in the emitter. The existence of these holes causes the non-radiative Auger recombination and deteriorates the laser performance. Heavy doping, on the other size, may cause large free-carrier absorption loss and impurity scattering loss in the active region. In this work, the thickness of the electron injector was thinned to improve the electron injection efficiency by increasing the subband energy level of the electron injector. The doping concentration required for the carriers' rebalance was reduced, which led to a low internal loss. Two ICL wafers were grown in a molecular beam epitaxy system on Te-doped GaSb substrates, achieved excellent room temperature lasing performance. One stage of the active region of sample S1 is as follows: 2.5 nm AlSb/1.8 nm InAs/3.0 nm $\text{Ga}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{Sb}$ /1.5 nm InAs/1.0 nm AlSb/3.0 nm GaSb/1.0 nm AlSb/4.5 nm GaSb/2.0 nm AlSb/3.4 nm InAs/1.2 nm AlSb/3.0 nm InAs/1.2 nm AlSb/2.6 nm InAs/1.2 nm AlSb/2.1 nm InAs/1.2 nm AlSb/1.8 nm InAs/1.2 nm AlSb/1.8 nm InAs, where the underlined InAs QWs were doped with Si to $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. For comparison, sample S2 with a thick electron injector of 4.2 nm InAs/1.2 nm AlSb/3.2 nm InAs/1.2 nm AlSb/2.5 nm InAs/1.2 nm AlSb/2.1 nm InAs/1.2 nm AlSb/1.8 nm InAs/1.2 nm AlSb/1.8 nm InAs and a $\text{Ga}_{0.65}\text{In}_{0.35}\text{Sb}$ hole QW in the emitter was grown. The electron subband of the thick electron injector in sample S2 is lower than that in sample S1, resulting in an inefficient electron injection into the emitter. Laser bars with a 4-mm-long cavity and 20- μm -wide ridge were fabricated from wafers S1 and S2. They exhibit similar threshold current of 200 mA and output power of 55 mW per facet, while sample S1 shows a turn-on voltage 2.3 V high than sample S2. The calculated energy band structures of the two samples indicate that the semimetallic interface for resonant tunneling in sample S1 is formed at a high electric field of 170 kV compared to 85 kV for sample S2, which is agreed to the high turn-on voltage of sample 1. Furthermore, the variable cavity length analysis on a series of laser bars with different cavity lengths was conducted to extract the waveguide loss α_w , internal quantum efficiency η_i , differential current gain G , transparency current density J_{tr} , and carrier lifetime τ for the two samples. As expected, sample S1 with a thin electron injector has a waveguide loss of 3 cm^{-1} , which is lower than 4.79 cm^{-1} for sample S2 with a thick electron injector. Other extracted parameters are similar for the two wafers, including the carrier lifetime of 0.7 ns. Theoretically, sample S1 with lower waveguide loss should have a long carrier lifetime. It is noted that the strain of GaInSb QWs relative to GaSb substrates is larger for sample S2. It is known that a large strain results in a strong decoupling of the heavy-hole and light-hole subband edge, which is beneficial to suppress the PPN auger nonradiative recombination in the emitter. Thus the large strain in sample S2 tends to compensate to a certain extent the effect of carrier injection unbalance on the gain of the emitter. The combined effect is that the carrier lifetimes of the two samples are almost same. In summary, the reduced InAs QWs thicknesses of the electron injector in the ICL designed in this work improved the electron injection efficiency, thereby balancing the carrier density with low doping concentration. The laser with lowered doping concentration and thin electron injectors produced a waveguide loss as low as 3 cm^{-1} . The laser performance is expected to be improved by increasing the strain to reduce the Auger recombination further.

Key words: Semiconductor laser; Midinfrared; Molecular beam epitaxy; Interband cascade laser; Quantum well; Antimonide

OCIS Codes: 140.5960; 140.3070; 230.5590; 130.0250; 140.3380