

Research Progress in High Power Cascade Lasers with Tunnel Junctions

Zhenyu Wen, Jianjun Li, Hongkang Cao, Zexu Yuan, Menghuan Wang

Key Laboratory of Opto-Electronics Technology, Ministry of Education, Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing

Email: wenzhenyu@emails.bjut.edu.cn

Received: Nov. 12th, 2018; accepted: Nov. 23rd, 2018; published: Nov. 30th, 2018

Abstract

This article analyzes the development of cascade semiconductor lasers with tunnel junctions, technological breakthroughs and process optimization, and highlights some of the optimization and innovation of high-power semiconductor tunnel cascade lasers in the research field.

Keywords

High Power, Tunnel Junction, Semiconductor Laser, Cascade

大功率隧道结级联半导体激光器研究进展

文振宇, 李建军, 曹红康, 袁泽旭, 王梦欢

北京工业大学信息学部, 省部共建光电子技术教育部重点实验室, 北京

Email: wenzhenyu@emails.bjut.edu.cn

收稿日期: 2018年11月12日; 录用日期: 2018年11月23日; 发布日期: 2018年11月30日

摘 要

对半导体隧道结级联激光器的发展近况和技术突破以及工艺优化进行分析总结, 着重介绍了大功率半导体隧道结级联激光器在研究领域的部分性能的优化以及创新点。

关键词

大功率, 隧道结, 半导体激光器, 级联

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自 1962 年美国首次成功研制第一代半导体激光器，半导体激光发展至今有着瞩目的进步及应用。其发展不仅是理论上的不断推进，更得益于材料的生长技术和制备工艺的完善，随着各种新型材料的出现，半导体激光器的结构及制备方法也得到更广泛的拓展。半导体激光器在研究领域的巨大发展和提升也逐渐上升到实际应用方面的扩展和创新，在世界各国的国民经济中有着重要的地位，尤其是通信、工业、军事、雷达、医疗等方面起着不可替代的作用。

由于大功率半导体激光器具有结构简单、体积小、寿命长、易于调制和价格低廉等优点，应用广泛。为了提高半导体激光器的输出功率，通常是通过提高注入电流实现的，但随着注入电流的提高却会引起器件内部产生的大量的热，而且是呈平方量级增长，因此导致器件的烧毁。随后出现采用大光腔的结构，不仅可以提高输出功率，而且能提高腔面损伤的阈值，但是其设计尺寸大小上存在限制，并不能够无限增大，而且光腔的增大意味着激光器的阈值电流也会随之增大，从而会降低效率。采用分立管芯叠层烧结[1]的方法将多个半导体激光器串联也可以达到提高光功率密度的效果，但由于管芯厚度的原因，使激光器的输出功率密度降低。利用隧道结技术在材料外延过程中直接将多个激光器外延层串联，可以在更小的空间内集成多个激光器，这种激光器称为隧道带间级联多源区激光器[2]，图 1 为其典型结构[3]。

为了明确国内与国外在大功率隧道结级联半导体激光器上的差距，以及引起此研究领域者的重视，为国内市场提供更加优秀的器件，本文从国内以及国外的在大功率隧道结级联半导体激光器的研究进展以及简单介绍国外现有的商业产品着手，进行了耦合以及非耦合分类下的概括描述。

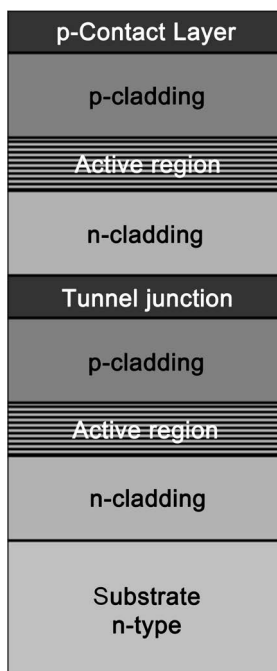


Figure 1. Tunnel junction cascaded semiconductor laser structure

图 1. 隧道结级联半导体激光器结构

2. 隧道结级联半导体激光器原理

对于隧道级联激光器, 其能带及工作机理[4]如图 2, 从图中我们得知, 注入的电子辐射复合后产生一个光子, 然后电子从导带跃迁至价带, 当隧道结反偏, 在电场的作用下, 复合后的电子隧穿再生至第二个有源区的导带继续进行辐射复合并产生光子。理论上在两电极之间注入一个电子, 可以在 n 个有源区中复合 n 次, 产生 n 个光子, 因而量子效率可以成倍增加, 也就可以突破常规激光器量子效率小于 1 的极限。通过这种原理制备的激光器不需要叠层烧结工艺, 从而大幅降低工艺复杂程度以及成本, 提高成品率, 还能改善光束质量, 增加光功率密度。图 3 为一个双有源区隧道结级联半导体激光器的结构图[5]。

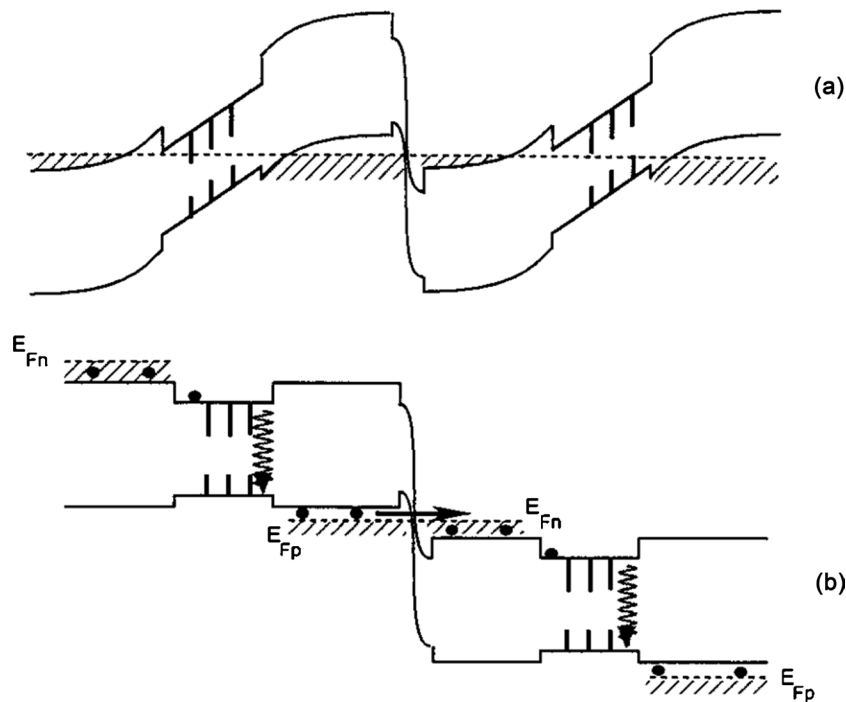


Figure 2. Working mechanism of tunnel cascaded multi-active region semiconductor lasers, (a) the energy band at zero bias, and (b) the bias voltage band

图 2.隧道级联多源区半导体激光器工作机理, (a) 为零偏压时的能带, (b) 为加偏置电压能带

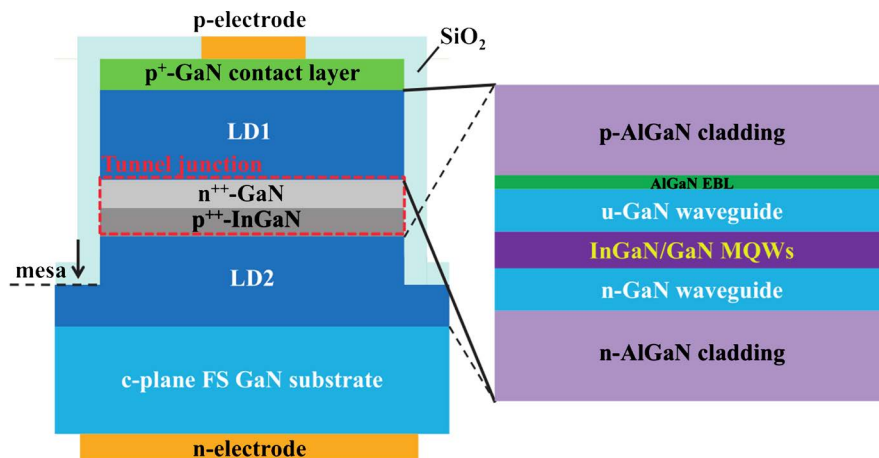


Figure 3. Double-active-area tunnel junction semiconductor laser lateral structure

图 3. 双有源区隧道结半导体激光器横面结构

在理想条件下，隧道结级联半导体激光器的内量子效率为每个有源区的内量子效率与有源区数量的乘积，假设单个有源区的内量子效率为 η_0 ，则 n 个有源区的隧道结级联半导体激光器的内量子效率为：

$$\eta_i = n\eta_0$$

而外量子效率为：

$$\eta_d = n\eta_0 \frac{\ln \frac{1}{R_1 R_2}}{2\alpha L + \ln \frac{1}{R_1 R_2}}$$

L 为腔长， R_1 ， R_2 为端面反射率，由于增加有源区会增加新的损耗，所以隧道级联激光器的外量子效率并非普通单个激光器的外量子效率的 n 倍。

隧道结级联半导体激光器的总功率转换率为：

$$\eta_t = n\eta_0 \frac{\ln \frac{1}{R_1 R_2}}{2\alpha L + \ln \frac{1}{R_1 R_2}} \cdot \frac{(I - I_{th0})h\nu/e}{I\{V_{th0} + [(1-1/n)R_t + R_v](I - I_{th0})\}}$$

其中 $h\nu$ 为光子能量， V_{th0} 和 I_{th0} 分别为单个有源区的阈值电压和阈值电流， R_t 和 R_v 为每个级联和有源区引入的电阻，由上式可以推算出随着有源区的数量增加到一定数量的时候，转换效率会稍微降低。

激光器的激射条件为：

$$2L \int g(x)E^2(x)dx = \alpha_m$$

L 为腔长， α_m 为腔面反射损耗，对于普通激光器，假设净阈值增益为 g_0 ，光限制因子为 Γ_0 ，则有：

$$g_0\Gamma_0 - (1 - \Gamma_0)\alpha' = \frac{\alpha_m}{2L}$$

每个有源区的净增益为 g ，有源区的总光限制因子为 Γ ，则有：

$$g = \frac{g_0\Gamma_0 + \alpha_t\Gamma_t}{\Gamma}$$

假设没有引入损耗 α_t ，只要器件的总光限制因子不大与普通单有源区激光器的光限制因子，则可以获得更低的阈值。

3. 隧道级联半导体激光器研究状况

1982年贝尔实验室的 van der Ziel 和 Tsang [6]首次提出由两个高掺杂反向偏置的隧道结串联的三有源区结构的半导体激光器。该激光器采用 MBE 的外延技术生长，隧道结的掺杂浓度达 10^{19} cm^{-3} ，在使用 200 ns 的脉冲信号下，激光器的阈值电流密度为 1.4 KA/cm^{-2} ，差分子效率为 0.8，即平均每层为 0.27，其值相对较低归因于有源层与包层之间的界面损耗。这种多层激光器比单个的激光器具有更高的连续输出，且具有足够小的光斑尺寸，这在光纤的应用上更具优势，但是其散热效果相比将多个单激光器人工焊接在一起时更差。从此开始，隧道结级联半导体激光器的研究以及商业应用成为人们关注焦点。

3.1. 非耦合隧道结级联激光器

1997年 J. Ch. Garcia [4]等人提出双波长(956 nm 和 985 nm)的低阻隧道结级联激光器，并具有两个阈值特性。他们研究了不同隧道结的电阻率，尽管同质结具有更好的电阻特性，但是考虑到带间吸收，为

减少损耗他们采用 InGaAs/GaAs 异质结作为隧道结, 通过 CBE 外延技术得到高掺杂低电阻率的隧道结。在室温下, 脉冲信号 100 ns, 频率 1 KHz 下, 激光器得到两个明显的激射波段以及不同的阈值, 分别为 420 A/cm^2 和 990 A/cm^2 。需要说明的是, 过高的阈值电流密度不是由于隧道结所造成, 可能原因是顶层在刻蚀过程中影响时间更长而导致表面复合更高。通过 CBE 外延可得到低电阻率隧道结, 从而使成本效益更高的高功率隧道级联激光器的制造成为可能。

1999 年, S.G. Patterson 等人[7]首次提出在室温下连续光输出的隧道结级联激光器, 他们通过设计外延生长温度, 从而提高器件性能, 实验测试下, 激光器能在室温条件下连续工作, 斜率效率在输入电流 48 mA 时由 0.319 A/W 增大为 0.622 A/W , 得出两个电流阈值为 1.95 kA/cm^2 和 2.18 kA/cm^2 , 经测量在增益引导设备下工作时的外部效率达 99.3%, 这为室温下连续输出双极隧道结级联激光器的成功提供有力证明。2000 年[8], 他们对此激光器的温度特性进行了研究, 散热片温度在 $10^\circ\text{C}\sim 40^\circ\text{C}$ 时的激光器连续工作的特征温度为 102.5 K, 而当散热片温度在 $50^\circ\text{C}\sim 80^\circ\text{C}$ 时, 激光器的特征温度下降为 55.7 K, 研究发现顶层和底层的有源区互为各自的加热源, 且当输信号大于顶层有源区的阈值时, 激光器的差分斜率效率将会开始降低。

激光器功率损耗的优化。2002 年, W.J. Siskaninetz [9]等人采用 MBE 外延系统, 通过设计外延层的厚度、生长时间和温度来优化器件结构, 并且将隧道结的掺杂浓度由 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 提高至 $8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 经过对比实验发现, 提高 P 型掺杂浓度可以显著提高器件的工作电压性能, 而减小隧道结 P 掺杂厚度对电压性能的影响非常小, 且对器件电流特性的影响最小。

2006 年, Jingzhou Yan [10]等人提出一种双波长隧道结级联激光器, 激射波长分别为 1350 nm 和 1450 nm, 经实验测试, 短波的有源区最先激射, 阈值电流为 170 mA (另外长波处的阈值电流为 280 mA), 最先激射的原因是短波多量子阱有源区具有更窄的条宽, 这与他们推测相反, 即短波难以实现激光发射, 并且光功率比长波长长 10 dB, 可能的解释是两个有源区分别位于两个 PIN 结构上, 可作为独立的电泵浦, 从而减少两种波长模式之间的增益竞争。经过他们的研究表明, 过设计隧道结级联激光器的几何结构可以在集成光子系统中实现同时多波长的激光发射。

S. M. Nekorkin 等人[11]在 2007 年为避免不同频率的模态交叉吸收, 实现相位匹配, 设计并提出一种双波长隧道结级联激光器, 长波段产生 TE_1 模, 短波段产生 TE_3 模。他们采用 MOCVD 外延技术生长激光器结构, 对于横向电流限制, 由 80 keV 的氢离子注入以形成 $100 \mu\text{m}$ 宽的条宽, 腔体切割成 $0.4\sim 1.5 \text{ mm}$ 的长度。他们在室温、输入信号脉冲宽度为 350 ns、重复率为 1.6 kHz 的条件下对激光器进行了测试, 明显的测量到 951 nm 和 1063 nm 两个波长, 两者的阈值电流为 10 A, 非线性信号的最大观测功率为 30 nW (输入电流为 35 A), 对于二次谐波, 测量出非线性转换率约为 10 nW/W^2 , 对于和频的产生, 测量的转换效率为 1 nW/W^2 , 与 $0.1 \mu\text{m}$ 的相干长度相吻合。实验显示他们设计的波导结构能够大大消除不同频率下激光模式的交叉影响, 并支持所有波长的低损耗模式。

3.2. 耦合隧道级联半导体激光器

2007 年, M. Müller [12]等人提出一种隧道级联激光器, 制作为波长 940 nm 长度为 10 mm 的三有源区激光器条时, 在输入脉冲信号长度为 $100 \mu\text{s}$, 工作周期为 1%, 其所能达到的最大连续输出功率为 615 W, 斜率效率为 3.38 W/A , 制作为波长 808 nm 的三有源区激光器条时, 在输入脉冲信号长度为 $20 \mu\text{s}$, 工作周期为 0.4%, 达到最大输出功率为 840 W, 且其电阻仅为 $2.8 \text{ m}\Omega$, 这与典型单级激光器的串联电阻一样低。他们还与五有源区激光器进行了比较, 发现激光器的差分效率, COD 水平与级联级数呈线性关系, 表明其制造的隧道结性能优良。

Jean-François Boucher 等人[3]于 2009 年提出一种新型的超高效率 1550 nm 的多级级联激光器, 单片

三有源区激光器的峰值输出功率超过 37 W, 发散角小于 35 度, 他们在 InP 结构上采用 MBE 外延技术生长 AlGaInAs-InP 激光器结构, 他们通过深刻蚀的工艺方法使得电流扩散限制在底部结的可以接受的水平内, 经过封装测试, 双有源区激光器的斜率效率是单有源区激光器的 1.5 倍, 而三有源区激光器是单有源区激光器的 2.5 倍, 他们的研究表明他们设计的 50 μm 宽孔径的 1550 nm 双有源区级联激光器已经可以作为可行的商业产品。

M. X. Feng 等人[13]在 2013 年提出一种高效的 GaN 基隧道结级联激光器, 他们将常规的 P 型 AlGaIn 包层和 P 型 GaN 接触层分别替换为低阻的 N 型 AlGaIn 包层和 N 型 GaN 接触层, 通过商业软件 LASTIP 数值研究, 他们所设计的隧道结级联激光器性能有非常大的提升, 相比之下, 吸收损耗和非辐射复合减少, 阈值电流和串联电阻分别降低了 12%和 59%, 斜率效率提高了 22.3%。在 120 mA 的注入电流下, 输出功率和光电转换效率分别提高了 34%和 79%。

Benjamin P. Yonkee 等人[14]于 2016 年采用 MOCVD 和氨基 MBE 组合的外延生长方式设计制造一种 GaN 隧道结级联激光器, 其二维激光器条大小为 1800 $\mu\text{m} \times 2.5 \mu\text{m}$, 在没有表面涂层的情况下阈值电流为 284 mA(阈值电流密度 6.3 kA/cm^2), 单边斜率效率为 0.33 W/A, 微分电阻为 $2.3 \times 10^{-4} \Omega$ 。

Manoj Kanskar 等人[15]在 2017 年提出一种大功率高效的 88x-nm 隧道结级联激光器条, 他们使用 MOCVD 外延技术生长激光器结构, 并通过优化隧道结的结构设计使隧道结电阻值低于 $8.0 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}^2$, 在脉冲信号 200 μs 、频率 14 Hz、散热片温度为 10 $^\circ\text{C}$ 的实验条件下, 一个 3 mm 宽、3 mm 腔长的激光器条的准连续工作输出功率为 630 W, 而一个 1 cm 宽、3 mm 腔长的激光器条的峰值输出功率达 1.8 kW, 单管双有源区激光器的阈值电流为 0.76 A, 峰值输出功率为 19 W, 斜率效率为 2.2 W/A。

Satoru Okawara 等人[5]在 2017 年提出一种双有源区氮化物基隧道结级联激光器, 他们采用 MOVPE 外延技术生长激光器结构, 经过实验测试, 在脉冲信号宽度为 20 ns、频率为 5 kHz、室温下峰值输出功率超过 10 W, 发射波长为 394 nm, 两个阈值电流为 2.4 和 2.5 A, 斜率效率分别为 0.8 和 0.3 W/A。

Czeslaw Skierbiszewski 等人[16]在 2018 年通过等离子体辅助分子束外延(PAMBE)技术生长了 450 nm 蓝光隧道结级联激光器, 他们发现在 PAMBE 生长期间不使用氢能够获得更低电阻的隧道结, 其阈值电流密度以及斜率效率和标准激光器相比较没有明显的差异; 对于大于 2 kA/cm^2 的电流密度, 隧道结激光器的串联电阻要比标准激光器高出一个数量级, 而且在相同的差分电阻率范围内, 他们所提出的隧道结激光器的开启电压高 0.6 V, 这为在高电流密度下的激光器器件运行开辟了新的前景。

3.3. 商业领域

经过多年研究国外现在已经有产品出售, Laser Diode Incorporated 公司[17]所研制的 905 nm 多结激光器条, 在脉宽 10 ns 的信号下峰值输出功率达 500 W, 阈值电流为 0.8 A, 工作温度范围为 $-40^\circ\text{C} \sim 85^\circ\text{C}$ (发光区 200 $\mu\text{m} \times 480 \mu\text{m}$); 所研制的一单管隧道结激光器在 50 ns, 1 kHz 时, 输出功率为 2.5 W (发光区 40 $\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$)。Laser Components 公司[18]所研制的 905 nm 多结激光器在 150 ns 脉宽信号下, 单管峰值输出功率达 70 W, 有效发光面积为 235 $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$, 其集成激光器条的峰值输出功率达 650 W, 有效发光面积为 200 $\times 10 \mu\text{m}$, 特别适用于医疗和光纤耦合。德国 Osram 公司[19]所研制的 905 nm 三有源区级联激光器在脉宽为 100 ns 的脉冲信号下, 峰值输出功率为 75 W, 发光区面积为 200 $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 。

4. 国内隧道级联半导体激光器研究状况

相对于国外, 国内在此方面的研究起步较晚, 与国外相比较有着明显的差距, 开展研究的主要单位有北京工业大学、中国电子科技集团第十三所、中科院半导体所等单位。

2000 年, 北京工业大学光电子实验室邹德恕、李建军等人[20]提出并实现了一种多源区隧道再生

耦合半导体激光器,他们使用低压 MOCVD 生长了 GaAs 隧道结以及半导体激光器外延结构,三有源区外微量子子效率达 2.2,输入电流 2 A 的条件下,激光器未镀膜的激光输出功率达 2.5 W。这是国内第一次报道并实现隧道结级联激光器的研究。

4.1. 隧道耦合级联激光器

2001 年北京工业大学光电子实验室邹德恕、李建军等人[21]对隧道耦合级联激光器的扩展电流进行了优化,利用双面电极新型结构很好的克服了电流的横向扩展,他们的设计结构方法使四有源区级联激光器输出功率从 1.65 W 提高至 2.45 W,斜率效率由 0.94 W/A 提高至 1.64 W/A。2003 年,该实验室[22]还研制了带间耦合多源区 980 nm 半导体激光器,在 2 A 注入电流下输出光功率 5 W 阈值电流 172 mA,斜率效率 3.24 W/A,阈值电流密度 273 A/cm²。

2006 年,李建军等人[23]通过传输矩阵法进行理论分析,然后提出并实现一种隧道再生四有源区大功率半导体激光器,通过实验对比,他们发现内限制层厚度为 0.5 μm 时,器件的性能最好,腔面未镀膜时,在 2 A 的注入电流下其光输出功率大于 5.02 W,斜率效率达 2.74 W/A。

2008 年中国电子科技集团公司第十三研究所陈宏泰等人[24]提出一种高斜率效率隧道结级联激光器,他们使用 LP-MOCVD 外延方法生长隧道结及其他结构,并采用 δ 掺杂技术,所制造的隧道结的电阻率小于 $2 \times 10^{-4} \Omega/\text{cm}^2$,制作成条宽 190 μm、腔长 800 μm 的条形双叠层隧道级联激光器在脉宽 200 ns,5 kHz,20 A 的工作电流下输出功率达 35 W,斜率效率达 1.8 W/A,而三叠层激光器的斜率效率大于 2.7 W/A。2010 年[25],他们对三叠层隧道级联激光器的结构进行了优化,提高了隧道结掺杂浓度并优化了耗尽区的宽度,将 900 nm 三叠层隧道结激光器制作成条宽 300 μm、腔长 800 μm 的条形激光器,在脉宽 200 ns,5 kHz,20 A 的工作电流下激光器输出功率达 55 W,斜率效率达 2.9 W/A,达到普通器件的 3 倍,隧道结的方向电压由之前的 0.93 V 优化至 0.4 V。2014 年,研究所的车相辉等人[26],在 900 nm 三叠层隧道结激光器基础上,设计了超大光腔结构,提高了激光器的输出功率,制作成条宽 200 μm、腔长 800 μm 的激光条,在室温、脉宽 100 ns、10 kHz、工作电流为 30 A 时,器件的输出功率达 85 W。

2013 年长春理工大学李辉等人[1]设计出了一种高功率 905 nm 隧道结级联激光器,他们采用 MBE 外延技术激光器材料,为了抑制电流扩展,采用了深腐蚀双沟结构在垂直于外延层生长方向光刻了两条深沟槽,该激光器在脉宽 100 ns、重复率 10 kHz、30 A 的工作电流条件下,最大输出功率达 80 W,斜率效率达 3.0 W/A。

2018 年重庆光电技术研究所的陈健等人[27]提出一种大功率隧道结半导体激光器,他们通过对光波导层厚度优化,增加光斑尺寸,提高了器件 COD 阈值,而串联电阻变化小。制作为 200 μm、腔长 900 μm 的激光器,脉冲宽度 200 ns、频率为 5 kHz 的室温测试条件下,器件峰值输出功率超过 70 W。

4.2. 隧道非耦合级联激光器

2003 年该实验室李建军[28]等人提出并实现一种隧道级联双波长可见光半导体激光器,他们采用 MOCVD 外延技术一次外延生长两个有源区激光器结构,为了抑制电流横向扩展,采用了双沟深腐蚀结构,经过实验测试,两个波长为 699 nm 和 795 nm,阈值电流为 177 mA,在 265 mA 时的光输出功率为 100 mW,斜率效率为 1.3 W/A,水平和垂直方向的发散角分别为 8°和 34°。

2016 年李建军、司东海等人[29]设计并提出一种 905 nm 隧道级联非耦合双有源区半导体激光器,他们采用 MOCVD 外延技术生长器件结构,为抑制电流横向扩展,采用了深腐蚀脊型结构,经过实验测试,在脉宽 100 ns、50 Hz 条件下,器件的阈值电流为 0.6A,斜率效率为 1.12 W/A,是普通器件的 1.9 倍,水平和垂直发散角分别为 7.8°和 25.8°。

5. 结论

随着大功率隧道结级联半导体激光器的发展, 其应用也将越来越广泛, 而且相比较与普通激光器, 在提高输出功率方面有着巨大的优越性。从国内研究状况来看, 隧道结级联报道体激光器的主要的差距体现在器件的发热以及光束质量上, 随着研究的深入相信其电流扩展以及 COD 等问题也将在未来得到更好的解决, 大功率隧道结级联半导体激光器不论是在学术领域还是应用领域都有着广阔的前景, 将会为半导体激光器带来巨大的进步。

参考文献

- [1] 李辉, 曲轶, 张剑家, 辛德胜, 刘国军. 高功率 905nm InGaAs 隧道结串联叠层半导体激光器[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(10): 2517-2520.
- [2] 李建军, 崔碧峰, 邓军, 韩军, 刘涛, 李佳苑, 计伟, 张松. 非对称超大光腔 980nm 大功率半导体激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 63-67.
- [3] Boucher, J.-F., Vilokkinen, V., Rainbow, P. (2009) Ultra High Efficiency 1550 nm Multi-Junction Pulsed Laser Diodes. *Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering*, **7480**, 74800K.
- [4] Garcia, J.C., Rosencher, E., Collot, P., *et al.* (1997) Epitaxially Stacked Lasers with Esaki Junctions: A Bipolar Cascade Laser. *Applied Physics Express*, **71**, 3752. <https://doi.org/10.1063/1.120408>
- [5] Okawara, S., Aoki, Y., Kuwabara, M., *et al.* (2017) Nitride-Based Stacked Laser Diodes with a Tunnel Junction. *Applied Physics Express*, **11**, 012701. <https://doi.org/10.7567/APEX.11.012701>
- [6] van der Ziel, J.P. and Tsang, W.T. (1982) Integrated Multilayer GaAs-Lasers Separated by Tunnel-Junctions. *Applied Physics Letters*, **41**, 499-501.
- [7] Patterson, S.G., Petrich, G.S., Ram, R.J. and Kolodziejski, L.A. (1999) Continuous-Wave Room Temperature Operation of Bipolar Cascade Laser. *Electronics Letters*, **35**, 395. <https://doi.org/10.1049/el:19990285>
- [8] Patterson, S.G., Lau, E.K., Pipe, K.P. and Ram, R.J. (2000) Temperature Characteristics of Bipolar Cascade Lasers. *Applied Physics Letters*, **77**, 172. <https://doi.org/10.1063/1.126914>
- [9] Siskaninets, W., Ehret, J.E., Dang, T.N., *et al.* (2002) Reduced Power Consumption in GaAs-Based Bipolar Cascade Lasers. *Electronics Letters*, **38**, 1259-1261.
- [10] Yan, J.Z., Cai, J.X., Ru, G.Y., *et al.* (2006) InGaAsP-InP Dual-Wavelength Bipolar Cascade Lasers. *IEEE Photonics Technology Letters*, **18**, 1777-1779.
- [11] Nekorkin, S.M., Biryukov, A.A., Demina, P.B., *et al.* (2007) Nonlinear Mode Mixing in Dual-Wavelength Semiconductor Lasers with Tunnel Junctions. *Applied Physics Letters*, **90**, 171106. <https://doi.org/10.1063/1.2731523>
- [12] Muller, M., Philippens, M., Groninger, G., *et al.* (2007) Monolithically Stacked High-Power Diode Laser Bars in Quasi-Continuous-Wave Operation Exceeding 500 W. *Proceedings Volume 6456, High-Power Diode Laser Technology and Applications V*, 64561B.
- [13] Feng, M.X., Liu, J.P. and Zhang, S.M. (2013) High Efficient GaN-Based Laser Diodes with Tunnel Junction. *Applied Physics Letters*, **103**, 043508. <https://doi.org/10.1063/1.4816598>
- [14] Yonkee, B.P., Young, E.C., Lee, C., *et al.* (2016) Demonstration of a III-Nitride Edge-Emitting Laser Diode Utilizing a GaN Tunnel Junction Contact. *Optics Express*, **24**, 7816-7822. <https://doi.org/10.1364/OE.24.007816>
- [15] Kanskar, M. (2017) High Power and High Efficiency 1.8-kW Pulsed Diode Laser Bar. *Journal of Photonics for Energy*, **7**, 016003. <https://doi.org/10.1117/1.JPE.7.016003>
- [16] Skierbiszewski, C., Muziol, G., Nowakowskiskudlarek, K., *et al.* (2018) True-Blue Laser Diodes with Tunnel Junctions Grown Monolithically by Plasma-Assisted Molecular Beam Epitaxy. *Applied Physics Express*, **11**, 034103. <https://doi.org/10.7567/APEX.11.034103>
- [17] <https://www.laserdiode.com/>
- [18] <https://www.lasercomponents.com/en/>
- [19] <https://www.osram.com/os/>
- [20] 廉鹏, 殷涛, 高国, 邹德恕, 陈昌华, 李建军, 沈光地, 马骁宇, 陈良惠. 新型多有源区隧道再生光耦合大功率半导体激光器[J]. 物理学报, 2000(12): 2374-2377.

- [21] 邹德恕, 崔碧峰, 李建军, 廉鹏, 徐晨, 韩金茹, 刘莹, 杜金玉, 张丽, 高国, 沈光地. 隧道带间耦合级联新型激光器扩展电流的优化[J]. 光电子·激光, 2001(10): 989-991.
- [22] 邹德恕, 廉鹏, 李建军, 徐晨, 韩军, 俞波, 刘莹, 张丽, 崔碧峰, 高国, 沈光地. 带间耦合多有源区大功率 980nm 半导体激光器[J]. 光电子·激光, 2003(2): 111-113.
- [23] 李建军, 韩军, 邓军, 崔碧峰, 廉鹏, 邹德恕, 沈光地. 隧道再生四有源区大功率半导体激光器[J]. 光学学报, 2006(12): 1819-1822.
- [24] 陈宏泰, 张世祖, 杨红伟, 林琳, 王晓燕, 花吉珍, 刘英斌, 安振峰. 高斜率效率隧道结叠层激光器的研制[J]. 微纳电子技术, 2008(5): 260-263.
- [25] 林琳, 陈宏泰, 安志民, 车相辉, 王晶. 900nm 三叠层隧道级联激光器的结构优化研究[J]. 微纳电子技术, 2010, 47(7): 397-400.
- [26] 车相辉, 宁吉丰, 张宇, 赵润, 任永学, 陈宏泰. 大功率 900nm 超大光腔三叠层隧道级联激光器[J]. 半导体技术, 2014, 39(6): 423-427.
- [27] 陈健, 廖柯, 熊煜, 周勇, 刘尚军. 大功率单隧道结半导体激光器的研制[J]. 半导体光电, 2018, 39(3): 345-349.
- [28] 李建军, 沈光地, 郭伟玲, 廉鹏, 韩军, 邓军, 邹德恕. 新型隧道带间级联双波长半导体激光器[J]. 中国激光, 2003(11): 961-964.
- [29] 司东海, 李建军, 付莹莹, 邓军, 韩军. 905nm 隧道带间级联非耦合双有源区半导体激光器[J]. 光电子·激光, 2016, 27(2): 139-144.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5450, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: oe@hanspub.org