

文章编号:1001-5078(2025)06-0855-06

· 激光器技术 ·

高功率中红外量子级联激光器设计研究

常俊利, 索华东, 段凯, 朱国利
(中国电子科技集团公司第二十七研究所, 河南 郑州 450046)

摘要:为了解决国产中红外波段半导体单靶条输出激光功率低,暂时无法在工业上大规模应用的问题。提出将四个半导体靶条激光模块进行空间合束,从而提高中红外波段量子级联激光器总的输出功率。通过设计镜片与微调光路等光束整形技术,很好的解决了四路激光在空间合束过程中遇到的光束质量变差,光束整形、合束后如何改善光束质量问题;驱动控制与控温模块中,电流驱动控制电路和控温电路精确的对输入激光器的电压,电流,温度进行稳定控制,使量子级联激光器在室温下能够实现稳定的高功率输出。设计出高的室温输出功率、较小发散角、窄线宽和宽带可调谐的量子级联激光器具有重要的社会和军事意义,也有广泛的实用前景。

关键词:中红外波段量子级联激光器;空间合束;光束整形技术;驱动控制与控温模块

中图分类号:TN248;TN977 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2025.06.004

Research on design of high-power mid-infrared quantum cascade laser

CHANG Jun-li, SUO Hua-dong, DUAN Kai, ZHU Guo-li
(The 27th Research Institute of CETC, Zhengzhou 450046, China)

Abstract:This paper addresses the challenge of low output power in domestically produced mid-infrared semiconductor single-bar lasers that currently limits their industrial scalability. Initially, four semiconductor target laser modules are spatially combined to increase the total output power of the quantum cascade laser in the mid-infrared band. Subsequently, through optical component design and fine-tuning of light paths, beam shaping techniques effectively resolve the degradation of beam quality during the four-channel spatial combining process, while simultaneously optimizing the beam quality post-combination. Additionally, in the drive control and temperature control module, the current drive control circuit and temperature control circuit accurately and stably control the voltage, current and temperature of the input laser, so that the quantum cascade laser can achieve stable and high-power output at room temperature. The design of quantum cascade laser with high output power at room temperature, minimal divergence angle, narrow line width and wide tunability is of great social and military importance, as well as having a wide range of practical prospects.

Keywords:mid-infrared quantum cascade laser; space beam combination; beam shaping technology; driver control and temperature control module

1 引言

中远红外波段有两个大气窗口,分别为3~5 μm (中波红外)和8~14 μm (长波红外)。这两个窗口范围内的米氏散射效应相对较弱^[1],可使在此

波段的光单次无中继传输距离超过10 km。因此,这两个窗口波段的光在直接红外对抗、痕量气体检测、自由空间通信等方面都具有重要的应用需求和广阔的研究意义^[2]。

常规的半导体激光器单个光子能量约为 $0.04 \sim 0.4 \text{ eV}$, 而半导体材料依靠导带电子和价带空穴的带间跃迁复合发光所需的能量比单光子能量要大得多, 因此常规半导体激光器很难实现中远红外波段的激光输出。随着中波红外量子级联激光器的发明, 有效解决了中远红外波段激光光源稀缺的问题, 从而使中红外波段半导体激光器得到迅速发展和广泛应用。但是, 单个中红外半导体激光器件的输出功率小, 且由于光电转换效率低, 激光发射过程中产生大量的热能, 致使工作温度升高, 无法长时间稳定工作。本文设计在室温下稳定工作, 输出较高功率、较小发散角、窄线宽和宽带可调谐的量子级联激光器, 具有重要的社会和军事意义, 也有广泛的实用前景。

2 系统设计组成

半导体激光器由于体积小、重量轻、可便携, 激光输出效率高等优点, 使研究人员不断对中红外半导体激光器进行改进。过去, 中红外半导体激光器电光效率低, 且单靶条输出功率不高, 妨碍了许多潜在应用。随着量子级联激光器的全新设计和革新技术开发, 使其在中红外波段的小型化、可调谐、窄线宽、室温运转、输出功率高等方面具有重大优势^[3-4], 已经成为当前研究的热点并将在其应用领域发挥更大的作用。

本文主要探究室温下中红外波段量子级联激光器热管理技术、光束合成技术、光束质量改善技术、驱动控制技术和光电一体小型化集成技术。最终完成高功率、高光束质量中红外量子级联激光器的小型一体化设计与实验研究。

中红外量子级联激光器主要由激光发射模块、光束整形与合束模块、驱动控制与控温模块三部分组成, 组成框图如图 1 所示。



图 1 中红外量子级联激光器组成

Fig. 1 Composition of mid-infrared quantum cascade laser

2.1 激光发射模块

激光发射模块由激光靶条、导热金刚石、正负电极及靶条热沉组成, 设计共需要四组激光发射模块,

实现四路中红外激光合束输出。本文选用中科院半导体所研制的中红外半导体激光发射模块, 单个模块的工作波长为 $4.5 \mu\text{m} \sim 4.7 \mu\text{m}$, 输出功率大于 1.2 W 。

2.2 光束整形与合束模块

光束整形与合束模块主要由非球面准直镜、反射棱镜及激光窗口镜组成, 主要完成四路激光的发散角压缩与空间合束输出。

2.3 驱动控制与控温模块

驱动控制与控温模块主要由电流驱动控制电路、通讯控制电路、TEC 驱动控制电路、风机等组成, 电流驱动控制电路主要实现激光工作电流、脉冲频率、脉冲占空比的控制, 通讯控制电路主要实现设备自检、设备与上位机的通讯控制、数据上传等功能, 控温模块主要实现激光发射模块的温度控制。

3 设计关键技术

3.1 量子级联激光器的热管理技术

单个量子级联激光模块(图 2)在工作时会产生大量的热, 热量的产生将会使量子级联激光器的阈值电流升高、电光转化效率降低和输出功率下降等负面影响。所以, 控制激光器在合适的温度下工作, 可以使量子级联激光器的工作状态得到最佳。降低温度一般是通过优化结构内部使热量快速的传导到热沉上, 然后把热沉上的热量传导到系统之外。主要是如何增加热沉的散热速度, 如何减少衬底上热量的叠加, 使温度分布更加均匀, 以达到总体的热能耗最小, 并使整体器件体积更小。

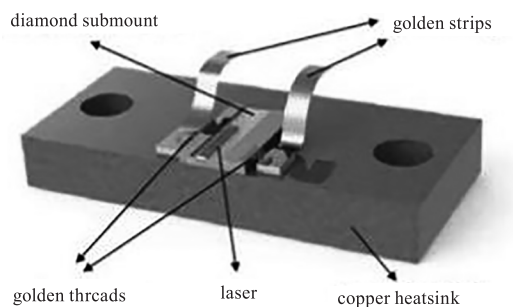


图 2 量子级联激光发射模块外形示意图

Fig. 2 Outline of quantum cascade laser emission module

3.2 量子级联激光器光束合成技术

目前, 因为受限于热效应和光学损伤, 导致量子级联激光器单束输出功率有限, 解决途径主要还是通过光束的合成技术, 将多束激光合成后提高输出功率。激光合束主要是基于半导体激光的相位、光

场分布、偏振及光谱等光学特性,考虑在此过程中,产生的折射、反射及衍射等光学效应,从而将多束低功率单元光束耦合成一束高功率的激光输出,同时还保有较高的光束质量,使半导体激光器输出光束亮度与功率获得极大提升,空间合束技术是半导体激光器实现高功率、高亮度激光输出的关键。目前光束合成的概念包括相干合成,非相干合成,光谱合成等技术^[5]。本文运用的是非相干合成技术中的空间合束,如图3所示。合束一般采用台阶式的空间合束方法,合理利用空间位置,调整光斑位置差,将四束激光光斑两两相切,在空间内合成一束。空间合束的方法相较其他相干合束最为简单,并可以获得较高的合束效率,最大程度的降低功率的损失,但合束后的光束质量会明显的变差。本次的研究主要是如何提高光束的合成效率,使输出功率最高,并控制合束光路使光斑尺寸最优。

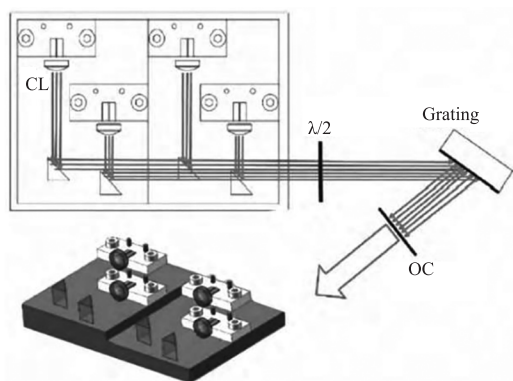


图3 空间合束示意图

Fig.3 Schematic diagram of spatial bundling

目前国外的单靶条量子级联激光器最高连续输出功率为5.6 W^[6],而国内最高不超过2 W,为了解决卡脖子问题,使器件国产化并且高功率输出,出射光需要非球面的准直镜对光束整形,减小发散角,准直后发散角约2 mrad。然后对整形后的光源进行合束,在合束时采用空间合束的方法,通过设计四个激光发射模块的空间排布,将四个光束在空间上合成一束,提高激光器的输出功率,空间合束较为简单,并且合成效率高,但光束质量变差,光束整形、合束中如何改善光束质量是一个关键研究内容。

3.3 量子级联激光器光束质量改善技术

量子级联激光器的核心结构是由分子束外延技术生长的半导体异质结,具有体积小、重量轻的优势,但光束质量比固体激光器的光束质量差。这是因为

半导体激光器的有源区一般是微米级,激发的激光也是微米级,相当于单缝衍射,会产生很强的衍射效应,得到的光束发散。所以研究如何减小发散角、如何优化光斑分布等内容,从而提升光束质量,在远场仍然可以获得高质量光束,满足应用要求。

光束整形与合束模块(图4)主要由非球面准直镜、反射棱镜及激光窗口镜组成。非球面准直镜将激光发散角从60°~70°压缩到~2 mrad;通过调整反射棱镜实现四路激光平行相切输出;激光窗口镜为激光输出口,镀中红外激光高透膜,为避免激光原路返回损坏器件,与光轴成2°夹角安装设计。

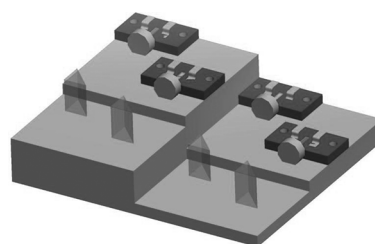


图4 光束整形与合束模块结构布局示意图

Fig.4 Structural layout diagram of beam shaping and beam combining module

根据激光原始发散角60°~70°,可以计算出发散角压缩为2 mrad时的透镜焦距和光斑尺寸分别为 $f=3.0$ mm和 $d=4.3$ mm,则反射棱镜的水平方向通光口径应大于6.5 mm,垂直方向应大于4.3 mm,四路激光按四象限对称排布,则激光窗口镜尺寸应大于19.5 mm,考虑传输效率及实际调试需要,光学件选型设计如下。

- (1) 非球面准直镜(型号:# 88-075): $f=3.0$ mm, $d=6.5$ mm,中心厚度2.62 mm;
- (2) 反射棱镜(型号:# 48-385):尺寸6.25 mm×6.25 mm×8.8 mm,反光面6.25 mm×8.8 mm,6.25 mm为垂直方向;
- (3) 窗口镜(型号:# 68-526):口径25.0 mm,厚度2 mm。

3.4 量子级联激光器驱动控制技术

量子级联激光器的驱动控制要求高精度、高稳定和高安全性。如果两端施加电压/电流过高,将会击穿半导体材料,造成器件损坏。同时,如果输出电压/电流不稳定,将会造成激光器不能正常工作,输出功率不稳定,严重时损伤元器件,降低使用寿命。因此需要研究如何控制工作电压/电流,使激光器能稳定的高功率输出,得到稳定的光束。此外,驱

动控制电路也是一个发热器件,需要合理的设计散热,减少热量对激光器的影响。

3.4.1 结构设计

驱动控制与控温模块主要由电流驱动控制电路、通讯控制电路、TEC 驱动控制电路、风机等组成,以上几种电路集成到一块 PCB 板上,尺寸如图 5 所示,在激光发射模块长和宽上分别加 50 mm 和 60 mm,电路板厚度不大于 15 mm。

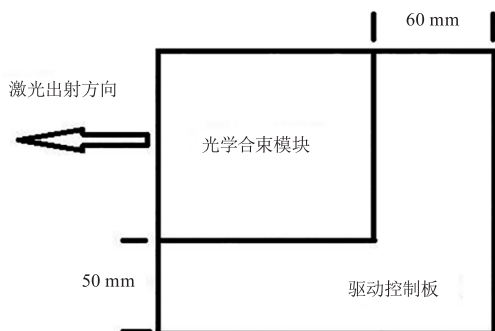


图 5 驱动控制与控温模块结构及空间布局设计

Fig. 5 Structure and spatial layout design of drive control and temperature control module

3.4.2 散热设计

设备热量主要来于四路激光发射模块,单模块发热量 30 W,四路热量共 120 W,120 W 热量首先传导到激光整形与合束模块的底板上,再通过 TEC 将热量带到散热器上,最后通过风机将散热器上的热量散掉。

采用 TEC 加散热器的方式进行风冷散热,机壳热面设计散热齿,并使用 4 个风机通过空气对流换热。暂定 3 路温度传感器进行温度采集,1 路采集激光发射模块的温度,放置于激光整形与合束模块底板上;1 路采集散热面的温度;1 路预留。风机散热面 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 时启动,低于 32°C 时休息。设备应用时,可以和系统接触面进行传导散热。

为了提高制冷效率,作如下设计:

1) 设计一个隔热罩,将需要控温的光束整形与合束模块罩起来,提升保温性能;

2) 固定光束整形与合束模块的螺丝与光束整形与合束模块进行隔热处理。

TEC 安装设计如图 6 所示,TEC 安装于激光整形、合束模块底面,对整个模块进行控温。

风机设计(图 7)为 4 路,和接插件安装在一个侧面,位于侧面靠下位置,通过吹风方式加速底面散

热器的换热效率。

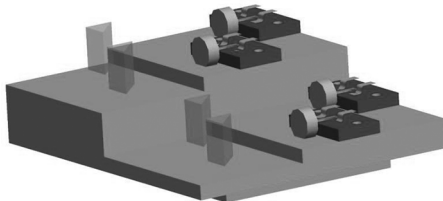


图 6 TEC 安装设计示意图

Fig. 6 TEC installation design diagram



图 7 风机安装设计示意图

Fig. 7 Fan installation design diagram

3.4.3 参数设计及使用设计

根据激光发射模块相关参数、制冷需求,并考虑通用应用需求,对四路直流工作 LD 和一路调制工作 LD 进行驱动控制,并实现四路 LD 的高精度控温。驱动控制与控温模块作如下设计:

1) 供电电压:DC 24 V $\pm$ 6 V;

2) 驱动控制电压、电流:恒流源驱动,15 V $\sim$ 16 V, 2 A 自适应;

3) 激光调制:调制频率:10 kHz $\sim$ 3 MHz (暂定);调制占空比:5 % $\sim$ 100 %,步进 5 % (暂定)。

参数设计控制驱动页面如图 8 所示。



图 8 驱动控制页面设计图

Fig. 8 Driver control page design

3.5 光电一体小型化技术

随着技术的发展,要求器件越来越集成化和

小型化。量子级联激光器在军事、民用设备中得到越来越多的应用,体积更小和结构紧凑的设备将增加应用的适装性,也可以使空间更加合理的利用。传统的中波激光器件在十几公斤以上,而量子级联激光器可以控制在几公斤以内。为了使体积和重量达到最优,需要研究如何优化设计各个单元模块。

机壳内部布局如图9所示,机壳内部主要含激光整形、合束模块,驱动控制电路和隔热罩等组成,激光器外形如图10所示。

4 实验数据与分析

系统设计完成后,通过驱动控制页面对输入的电流进行控制,并对每路激光的输出功率和温度进行实时监测。各靶条温度控制在 $15\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,为半导体激光器提供良好稳定的工作温度。每路激光输出功率与四路激光输出总功率记录如表1。

表1 各路靶条在不同输入电流下的输出功率

Tab.1 Output power of each target under different input current

程序输入 电流/A	第一路靶条输出 功率/W	第二路靶条输出 功率/W	第三路靶条输出 功率/W	第四路靶条输出 功率/W	四路靶条输出 总功率/W
0.8	0.026	0.025	0.016	0.018	0.072
0.9	0.027	0.030	0.018	0.030	0.096
1.0	0.028	0.031	0.021	0.042	0.116
1.1	0.134	0.144	0.128	0.136	0.523
1.2	0.483	0.496	0.476	0.500	1.75
1.3	0.834	0.835	0.828	0.872	3.08
1.4	1.18	1.16	1.19	1.20	4.54
1.5	1.50	1.55	1.56	1.69	5.82
1.6	1.82	1.94	1.98	1.96	7.21
1.7	2.07	2.12	2.25	2.15	7.93

图11展示了各路靶条在不同输入电流下的输出功率及四路输出总功率,从图11中可以看出,输入电流在 $1.0\text{ A} \sim 1.7\text{ A}$ 之间,量子级联激光器输出功率变化范围比较大。由于过高的注入电流容易致使量子级联激光器损坏,从保护器件正常使用的角度,设置中红外量子级联激光器的注入电流 1.5 A ,四路激光合束后的输出总功率为 5.82 W ,与单路激光输出功率总和 6.30 W 相比,激光能量损失较低。激光合束后经过红外相机成像后计算,合束后的激光发散角为 $3 \sim 4\text{ mrad}$,激光经窗口镜输出后,通过增加扩束镜,使激光发散角稳定在 1.2 mrad ,很好的保证远场激光稳定输出。

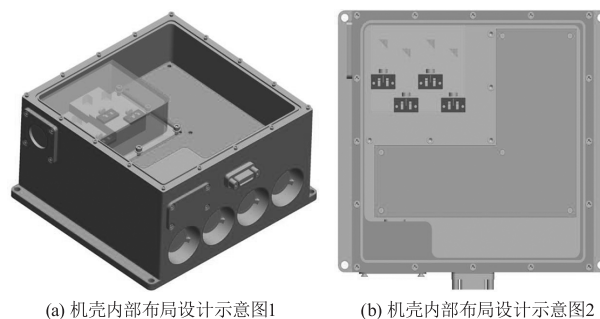


图9 机壳内部布局示意图

Fig.9 Schematic diagram of the internal layout of the chassis

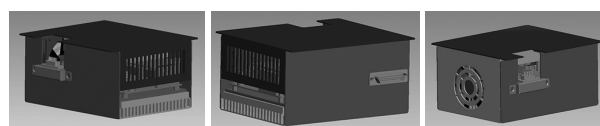


图10 中红外波段量子级联激光器三维外形结构图

Fig.10 3D outline structure of quantum cascade

laser in mid-infrared band

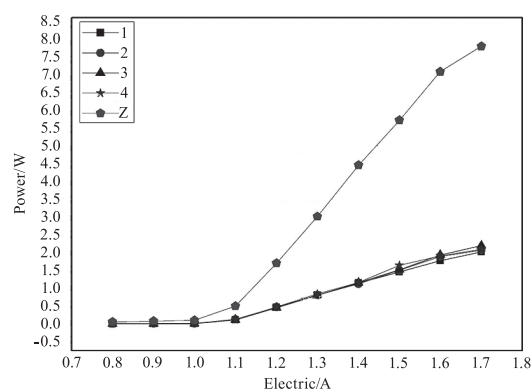


图11 各路靶条在不同输入电流下的输出功率及四路输出总功率

Fig.11 The output power of each target strip under different input currents and the total output power of four channels

5 结 论

本文通过将四路较低功率的国产中红外波段半导体激光模块进行空间合束,实现激光器室温下稳定输出较高功率。对空间合束过程中光束发散角过大及光束质量变差问题,进行了四路激光位置圆形相切的微调,使用非球面准直镜调整激光发散角,反射棱镜调整四路激光的相对位置,达到较高质量的四路合束激光输出。驱动控制与控温模块可以精确控制激光器的输入电流、电压,并实时监测每路激光的输出功率和经过合束后总的输出功率;通过温度传感器传递温度,TEC及风机等有效降低激光器产生的热量,将激光器工作温度进行实时监测与稳定的区间控制,从而使激光器能够正常稳定工作。本文研究的体积小,重量轻,容易便携,室温下输出较高合束激光功率的半导体量子级联激光器,在军事与科研应用中具有广阔的前景与深远的意义。

参考文献:

- [1] Zhao Y, Zhang J C, Liu C W, et al. Progress in mid-and far-infrared quantum cascade laser(invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(10): 1003001. (in Chinese)
赵越, 张锦川, 刘传威, 等. 中远红外量子级联激光器研究进展(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(10): 1003001.
- [2] Cheng N J, Li W F, Qi F. Progress of mid-infrared laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(17): 1700006. (in Chinese)
程乃俊, 李惟帆, 祁峰. 中红外激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(17): 1700006.
- [3] Liu Z Y, Bian J T, Shao L, et al. Research progress of mid-infrared laser technology[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(8): 853–858. (in Chinese)
刘尊洋, 卞进田, 邵立, 等. 中红外激光技术研究进展[J]. 激光与红外, 2013, 43(8): 853–858.
- [4] Sirtori C, Kruck P, Barbieri S, et al. GaAs/Al_xGa_{1-x}As quantum cascade lasers [J]. Applied Physics Letters, 1998, 73(24): 3486–3488.
- [5] Cao Y X, Shu S L, Sun F Y, et al. Development of beam combining technology in mid-infrared semiconductor lasers(invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(10): 1003002. (in Chinese)
曹宇轩, 舒世立, 孙方圆, 等. 中红外半导体激光器合束技术研究进展(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(10): 1003002.
- [6] Wang F, Slivken S, Wu D H, et al. Room temperature quantum cascade lasers with 22 % wall plug efficiency in continuous-wave operation [J]. Optics Express, 2020, 28(12): 17532–17538.