

# 连续波量子级联激光器高效率光束合成

吴昊<sup>1</sup> 舒世立<sup>1</sup> 刘峰奇<sup>2</sup> 宁永强<sup>1</sup> 王立军<sup>1</sup> 佟存柱<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033

<sup>2</sup>中国科学院半导体研究所, 半导体材料科学中科院重点实验室, 北京 100083

**摘要** 为获得能满足实际需要的高光功率输出, 可以将已经成功应用于近红外波段半导体激光器的合束技术移植到量子级联激光器。讨论了量子级联激光器件的共水平面布局设计, 这种设计有利于实现稳定可靠的室温连续工作; 在量子级联激光器单管器件整形实验中, 获得了光束质量因子  $M^2$  优于 2.3 的准直光束; 在高效率光束合成的实验中获得了 85% 的合束效率。

**关键词** 激光光学; 光束合成; 高效率; 量子级联激光器

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0702005

## High-Efficiency Beam Combination of Continuous-Wave Quantum Cascade Lasers

Wu Hao<sup>1</sup> Shu Shili<sup>1</sup> Liu Fengqi<sup>2</sup> Ning Yongqiang<sup>1</sup> Wang Lijun<sup>1</sup> Tong Cunzhu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Semiconductor Materials Science Chinese Academy of Sciences, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

**Abstract** In order to acquire high optical power for practical applications, technologies of beam combination which have been applied to semiconductors in near-infrared band successfully can also be employed to quantum cascade lasers (QCLs). The coplanar arrangement of QCLs is discussed which is helpful to maintain stable and reliable continuous-wave room-temperature operation of QCLs. In the experiment of collimation for a single QCL, collimated beams with beam quality factor  $M^2$  less than 2.3 are achieved. In the experiment of high-efficiency beam combination, the efficiency of 85% is achieved.

**Key words** laser optics; beam combination; high efficiency; quantum cascade laser

**OCIS codes** 140.5965; 140.3300; 140.3298

### 1 引言

室温连续工作量子级联激光器已成为中远红外和太赫兹波段的新颖激光源, 在化学传感、大气监控、自由空间光通信、红外对抗等方面应用广泛<sup>[1-2]</sup>。有别于传统半导体激光器在禁带两侧的电子空穴对受激复合发光的工作原理, 量子级联激光器可以仅使用单电子在级联的量子化子能级间连续受激跃迁并产生多个光子, 也就是说, 量子级联激光器是一种单极性器件。这种工作原理使得量子级联激光器的电光转换效率较高, 但同时也带来了有源区内严重的热积累, 从而限制了输出光功率的进一步提升。为提升量子级联激光器的输出光功率, 采用了一些新的结构与技术<sup>[3-4]</sup>, 但是单只量子级联激光器的输出光功率对于高功率应用来说仍是不够的。

为突破单只量子级联激光器的输出光功率极限, 在实际应用中有必要采用光束合成技术。光束合成技

收稿日期: 2015-01-16; 收到修改稿日期: 2015-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(61307032)、吉林省青年科研基金(20140520108JH)

作者简介: 吴昊(1984—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事激光应用方面的研究。E-mail: hwu@ciomp.ac.cn

\*通信联系人。E-mail: tongcz@ciomp.ac.cn

术已经成功地应用于近红外波段半导体激光器,出现了一系列高光束质量、高功率的激光光源,并且广泛应用于国防、工业等领域。该技术也已经被应用于中红外波段量子级联激光器。近年来,一些复杂的光束合成方案实现了接近衍射极限的高光束质量<sup>[5-9]</sup>,但是这些造价高昂的方案不仅光学装调困难,而且光束合成效率也仅有50%~81%,浪费了相当一部分昂贵的量子级联激光器输出光功率。其实在大多数应用中,更适合采用简单并且高效率的光束合成方法。展示了一种采用室温连续量子级联激光器的简单空间光束合成方法,该方法可以容易地获得较高的合束效率,从而最大程度节约昂贵的量子级联激光器输出光功率。此外,目前广泛应用于近红外半导体激光器的简单空间合束方法均是采用激光器非水平面台阶式布局,对于发热量很大的量子级联激光器,这种布局方式很容易使固定于较高台阶上的量子级联激光器过热损坏,因此采用了独特的激光器共水平面布局,可以保证所有量子级联激光器维持稳定可靠的室温连续工作状态。

## 2 光学设计

半导体激光器的出光腔面仅有微米量级,会出现很强的衍射现象,所以直接发出的光束具有很大的发散角,一般全角为 $15^{\circ}\sim 70^{\circ}$ ;同时因为半导体激光器芯片的横向与侧向波导尺寸不同,所以横模和侧模束腰的纵向位置不同,即具有一定的象散。因此有必要对半导体激光器的直接发射光束进行准直,才能在后端光路中加以使用。

传统的半导体激光器准直采用一片短焦距的快轴柱面镜与一片中短焦距的慢轴柱面镜相结合的方式,从而可以避免象散对准直的不利影响。但是这种方式带来了光学装调的复杂性,以及增加了合束系统中的不稳定因素。

针对中红外波段的量子级联激光器单管器件,一种简单有效的方法是使用一片短焦距的圆形非球面透镜做为准直元件,理由有以下两点:1)对于窄条宽量子级联激光器件,其横向和侧向波导尺寸相差不大,均为 $5\sim 10\ \mu\text{m}$ 量级,所以象散比较小,对单片透镜准直不会造成太大影响;2)采用单片透镜准直,可以降低光学装调的复杂性,减少透镜材料和减反射膜的吸收损耗,同时相对于采用两片快慢轴镜的准直方法,也减少了合束模块中的不稳定因素。

一般量子级联激光器单管器件在快轴方向(即材料外延生长方向)具有基模光场,光束质量较好;在慢轴方向(即垂直于材料外延生长方向)可能含有高阶空间模式光场,这会导致慢轴方向的光斑尺寸与发散角相对于基模光场同时放大,光束质量大幅度下降,所以量子级联激光器单管器件的快慢轴光束质量非常不均匀。所以应该选择在光束质量更好的快轴方向对光束进行空间密集排列,从而获得快慢轴方向光束质量更均匀的合成光束;同时这种合束方法通过细致的设计与装调,很容易获得很高的合束效率。

按照半导体激光器件通常的固定方式,选择在快轴方向进行光束合成,就需要将激光器件布局在不同高度的台阶上,这样会造成位于较高台阶上的激光器件距离底部制冷面过远,导致散热通道不畅通,对于发热量很大的量子级联激光器单管器件,这种非水平面台阶式布局很容易引起器件过热损坏。为保证量子级联激光器件稳定可靠的室温连续工作,可以将激光器件沿纵轴自旋 $90^{\circ}$ 侧立固定,使其快慢轴方向互换,这样在光束合成中就可以实现激光器件共水平面布局,从而保证每个激光器件散热通道畅通,连续工作稳定可靠。

基于以上的分析,采用ZEMAX光学软件对光束合成的光路进行了设计与仿真,如图1所示。设计中采用两只量子级联激光器单管器件QCL1和QCL2,并将其沿Z轴自旋 $90^{\circ}$ 放置,相当于将发射光束绕着传播方向自旋 $90^{\circ}$ ;采用短焦距、大数值孔径的圆形非球面透镜LENS1和LENS2分别对QCL1和QCL2的发射光束进行准直;后端光路采用平面反射镜R1和R2对两束准直激光束进行空间合成,即在Z轴方向进行密集排列。由于软件功能局限,模拟中激光器的发射光均为理想基模高斯光束,在出口处获得的近场及远场光斑模拟计算结果如图2所示,从图2(b)可以看到在远场获得了一个较大的光斑。该仿真结果可为实验提供指导与参考。

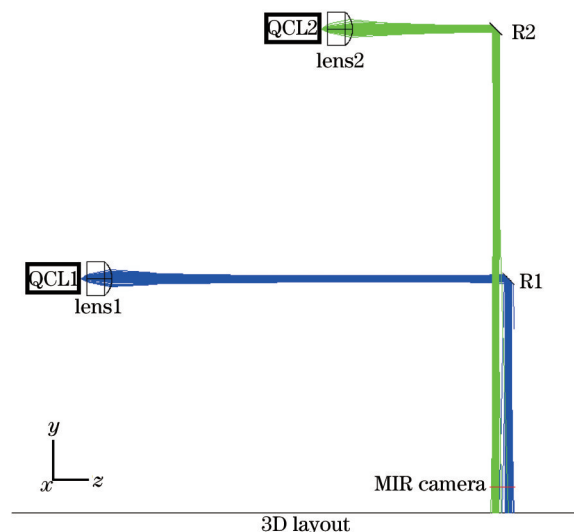


图 1 高效率光束合成光学设计图

Fig.1 Optical design of high efficiency beam combination

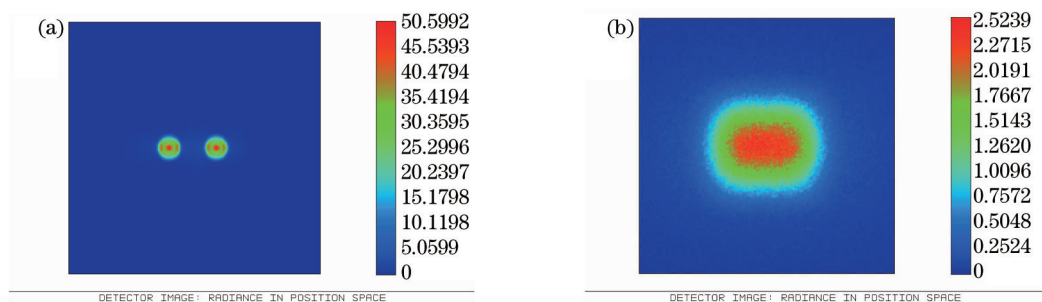


图 2 光场模拟计算结果。(a) 近场光斑; (b) 远场光斑

Fig.2 Results of optical field simulation. (a) Facula of near field; (b) facula of far field

### 3 实验与结果

#### 3.1 量子级联激光器单管器件光束整形

首先对量子级联激光器单管器件光束整形进行实验研究。实验中使用一只中心波长为  $4.6 \mu\text{m}$  的窄带宽量子级联激光器单管器件做为光源;使用焦距为  $0.7 \text{ mm}$ , 数值孔径为  $0.85$  的圆形非球面透镜作为准直元件,在光学装调中需要精密调节透镜的方向和位置,从而获得特定指向的低发散角光束。图 3 是沿光束传播方向不同距离处(从左往右分别距离激光器件出光腔面  $100, 200, 300, 400, 500 \text{ mm}$ )的光斑图像,从  $500 \text{ mm}$  处光斑图像可见量子级联激光器实际发射光不是理想的基模高斯光束,其远场光斑形貌为呈直线排列的 3 个瓣(一般在垂直于激光器材料外延方向分瓣)。根据这组光斑的尺寸可以描绘出准直光束的束宽变化曲线,如图 4 所示,可见准直后获得了很窄的光束,便于后端光路的设计。由图 4 可以计算出准直光束在快慢轴方向的光束质量因子  $M^2$  均小于  $2.3$ ,即获得了高光束质量的整形光束,为光束合成的设计与装调奠定了基础。

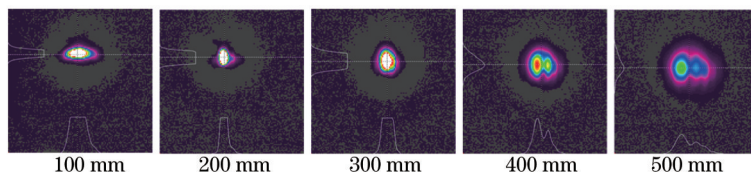


图 3 不同距离处准直光束的光斑图像(工作电流  $0.70 \text{ A}$ , 工作温度  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ )

Fig.3 Images of collimated beam spots at different positions (drive current of  $0.70 \text{ A}$ , working temperature of  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ )

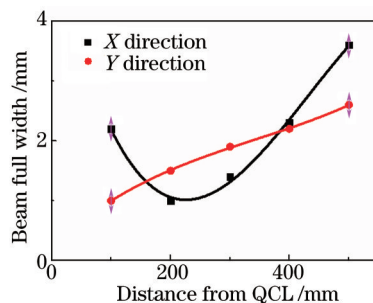


图4 准直光束的束宽变化曲线

Fig.4 Curves of collimated beam width

### 3.2 光束合成实验

根据前面的光学设计思路,进行了光束合成实验。实验中采用另外两只中心波长为  $4.6 \mu\text{m}$  的室温连续工作量子级联激光器单管器件,并将其沿纵向旋转  $90^\circ$  侧立固定于散热铜座上,铜座下面与热电制冷器连接,并结合控制器进行温控制冷,保证激光器件工作温度为  $20^\circ\text{C}$ ,热电制冷器的热面与底部的水冷板连接进行散热。由于激光器件布局于同一个水平面上,这样可以保证每只激光器件散热高效,模块整体散热均匀,从而实现稳定可靠的连续工作状态。实验中采用两片圆形非球面透镜分别对两只激光器件进行准直,获得了两束平行指向的低发散角光束。后面光路采用两块金膜反射镜,将两束准直光束密集排布,最终获得了更高功率的合成光束,出口光斑图像如图5所示,由于激光器单管器件自旋  $90^\circ$  放置,所以两束准直光的远场光斑在竖直方向分瓣,图5的光束排列方式与图2(a)是一致的。此外由于实验中采用的两只量子级联激光器单管器件的材料结构、芯片结构及封装方式都不同,所以造成两束准直光的光斑形貌和光束高度均有微小偏差,图5中两束光在竖直方向错开约  $1 \text{ mm}$ 。

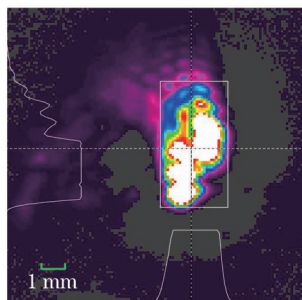


图5 合成光束的出口光斑图像

Fig.5 Image of beam spot after beam combination

实验还对光束合成模块的光功率-电流特性进行了测试,如图6所示,其中光功率数值进行了归一化处理。结合两只量子级联激光器单管器件独立工作时的光功率之和与合成光束的光功率测试结果,可以计算出合成光束的效率曲线,如图7所示。低电流下由于QCL2还未激射,QCL1的输出光全部通过反射镜R1偏折到达出口,此阶段合束效率均为  $100\%$ ;随着电流的增加,当QCL2刚开始激射时,光束发散角较小,大部分

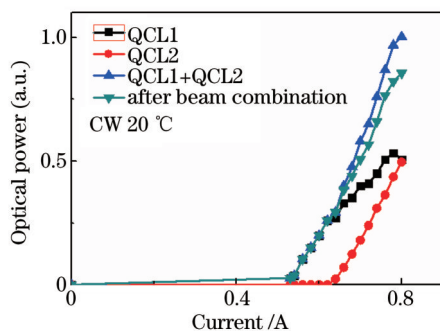


图6 合束前后光功率测试曲线

Fig.6 Curves of optical power with and without beam combination

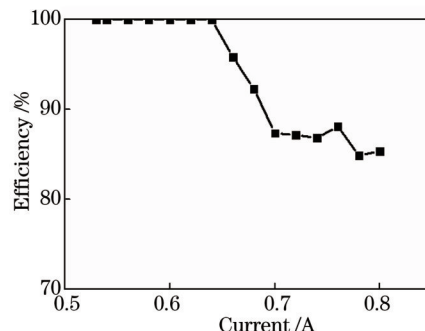


图7 合束效率曲线

Fig.7 Efficiency curve of beam combination

光功率都能通过反射镜 R1 的边缘到达出口,合束效率高于 90%;当电流进一步增加,QCL2 的发散角明显增加并趋于稳定,此时部分光功率会被反射镜 R1 边缘遮挡,导致合束效率下降并趋于稳定在 85%。

## 4 结 论

对于室温连续工作的量子级联激光器单管器件,可以通过热电制冷器和水冷装置相结合,并采用控制器进行温度控制,从而实现稳定可靠的工作。将量子级联激光器单管器件沿纵轴旋转 90°侧立固定,为了在快轴方向进行光束合成,可以将激光器件共水平面布局,从而实现模块整体均匀散热。采用短焦距、大数值孔径的圆形非球面透镜可以实现量子级联激光器单管器件的整形,实验中获得了光束质量因子  $M^2$  优于 2.3 的准直光束。采用平面反射镜对准直光束进行非相干叠加,可以获得高效率的合成光束,实验中获得了 85% 的合束效率。

## 参 考 文 献

- 1 F M Couto, M S Stihel, M P P Castro, *et al.*. Quantum cascade laser photoacoustic detection of nitrous oxide released from soils for biofuel production[J]. *Appl Phys B-Lasers Opt*, 2014, 117(3): 897-903.
- 2 S W Park, G Chen, I C A Chen, *et al.*. Tracing explosive in solvent using quantum cascade laser with pulsed electric discharge system[J]. *Appl Phys Lett*, 2014, 105(18): 184104.
- 3 M Razeghi, N Bandyopadhyay, Y Bai, *et al.*. Recent advances in mid infrared (3-5  $\mu\text{m}$ ) quantum cascade lasers[J]. *Opt Mater Express*, 2013, 3(11): 1872-1884.
- 4 R Blanchard, T S Mansuripur, B Goekden, *et al.*. High-power low-divergence tapered quantum cascade lasers with plasmonic collimators[J]. *Appl Phys Lett*, 2013, 102(19): 191114.
- 5 J Montoya, S J Augst, K Creedon, *et al.*. External cavity beam combining of 21 semiconductor lasers using SPGD[J]. *Appl Opt*, 2012, 51(11): 1724-1728.
- 6 G Bloom, C Larat, E Lallier, *et al.*. Passive coherent beam combining of quantum-cascade lasers with a Dammann grating[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(19): 3810-3812.
- 7 R Ostendorf, S Hugger, R Aidam, *et al.*. External cavity spectral beam combining of 4.6  $\mu\text{m}$  emitting quantum cascade laser arrays [C]. 22nd IEEE International Semiconductor Laser Conference, 2010: 51-52.
- 8 Liu Jiang, Liu Kun, Shi Hongxing, *et al.*. High-power all-fiber mid-infrared supercontinuum laser source[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(9): 0902004.  
刘 江, 刘 昆, 师红星, 等. 高功率全光纤中红外超连续谱激光光源[J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0902004.
- 9 Zhang Bin, Yang Weiqiang, Hou Jing, *et al.*. All-fiber mid-infrared supercontinuum source from 1.9  $\mu\text{m}$  to 4.3  $\mu\text{m}$ [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(11): 1102013.  
张 斌, 杨未强, 侯 静, 等. 1.9~4.3  $\mu\text{m}$  全光纤中红外超连续谱光源[J]. *中国激光*, 2013, 40(11): 1102013.

栏目编辑: 宋梅梅