

中红外半导体激光器合束技术研究进展(特邀)

曹宇轩^{1,2}, 舒世立¹, 孙方圆^{1,2}, 赵宇飞^{1,2}, 佟存柱¹, 王立军¹

(1. 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; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 中红外半导体激光器体积小、效率高, 在环境检测、空间通讯及军事国防等领域具有重要的应用前景。但是中红外半导体激光器单元器件输出功率低, 限制了其在以上领域的应用。激光合束技术是能够实现中红外半导体激光器功率提升的重要途径。文中详细介绍了几种用于中红外半导体激光器的合束方法及中红外半导体激光器合束方面的最新进展。

关键词: 半导体激光器; 中红外; 激光合束

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1003002

Development of beam combining technology in mid-infrared semiconductor lasers(*invited*)

Cao Yuxuan^{1,2}, Shu Shili¹, Sun Fangyuan^{1,2}, Zhao Yufei^{1,2}, Tong Cunzhu¹, Wang Lijun¹

(1. State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Mid-infrared semiconductor lasers possess the advantages of small volume and high efficiency and have important application prospects in the field of environmental detection, space communication and military defense. However, the output power of mid-infrared semiconductor laser device is low, which limits its application in the above fields. Laser beam combining technology is an important approach to enhance the power of mid-infrared semiconductor lasers. In this paper, several beam combining methods and the latest progress of mid-infrared semiconductor lasers were introduced in detail.

Key words: semiconductor laser; mid-infrared; beam combining

收稿日期: 2018-05-10; 修订日期: 2018-06-20

作者简介: 曹宇轩(1993-), 男, 硕士生, 主要从事中红外半导体激光器合束方面的研究。Email: b18204313186@163.com

通讯作者: 舒世立(1986-), 男, 副研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事中红外半导体激光器合束方面的研究。Email: shushili@ciomp.ac.cn

0 引言

中红外半导体激光器具有体积小、重量轻、效率高、寿命长等优点,在环境监测、激光雷达、医学诊断、空间通信及军事国防等领域有着重要的应用前景^[1-2]。目前,激光波长在中红外波段的半导体激光器主要有两种:一种为铽化物量子阱激光器^[3-7];另一种是量子级联激光器^[8-12]。铽化物量子阱激光器的激光波长覆盖 1.7~4.3 μm 波段。由于其制备工艺与半导体电子器件和集成电路的生产工艺相近,目前已成为 2~4 μm 波段主要的商用激光光源。量子级联激光器(Quantum Cascade Lasers, QCLs)是基于电子在半导体量子阱中导带子带间跃迁和声子辅助共振隧穿原理的新型单极半导体器件,工作波长覆盖 3~16 μm。自从 1994 年在贝尔实验室研制成功后^[13],量子级联激光器受到了国内外研究者的青睐。通过二十多年的研究,目前量子级联激光器在室温连续工作条件下获得了可喜的性能,其输出功率大于 5 W,电光转换效率达到 21%^[14-16]。

经过多年研究,以上两种中红外半导体激光器性能不断提高,但是由于受到器件结构及材料性质限制,进一步提高输出功率变得十分困难。目前,如何实现中红外半导体激光器在保持高光束质量的同时进一步提高其输出功率成为了国际上研究的重点。

合束是半导体激光器实现高功率、高亮度激光输出的关键技术。它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,通过折射、反射及衍射等光学效应,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,使得半导体激光器输出光束亮度与功率获得极大提升。根据参与合束激光单元的相干性要求和合束机理,激光合束技术可分为相干合束和非相干合束方法,其中典型的非相干合束方法包括空间合束、偏振合束、波长合束和光谱合束。激光合束技术在近红外半导体激光器领域发展比较成熟,但是由于中红外波段光学元件限制及苛刻的热管理要求,使得激光合束技术在中红外半导体激光器领域研究较少。下面将对已用于中红外半导体激光器的合束方法及研究进展进行详细介绍。

1 中红外半导体激光器相干合束

相干合束(Coherent Beam Combining, CBC)是通过控制单元光束之间的频率、相位差、振幅和偏振等参数,使得多个光束在远场进行干涉而合成一束的方法。主要有主动反馈式、耦合腔式和倏逝波式。目前用于中红外半导体激光器的相干合束方法主要是耦合腔式,它是利用谐振腔中共用段的耦合效应使各路激光光束在振荡时就互相关联,以保证其波长及相位的一致性。

目前采用相干合束对中红外半导体激光器进行合束的研究机构主要为法国的泰勒斯技术研究所^[17-18]。2010 年 Bloom 等人将两个量子级联激光器在迈克尔逊干涉谐振腔中进行相干合束^[17]。实验原理如图 1 所示。QCL1 和 QCL2 为两个激光波长为 4.5 μm 的量子级联激光器,前腔面镀减反膜($R < 2\%$),后腔面镀高反膜。OC 为输出耦合镜,采用的是反射率为 30% 的 GaAs 片。如图 1 所示,量子级联激光器后腔面与输出耦合镜之间形成了迈克尔逊谐振腔。由于激光倾向于在阈值最低的模式下振荡,这种共腔模式能够确保两束激光之间的相位锁定。两束激光在共输出端(图 1 中的(P))相长干涉,在另一个输出端(图 1 中的(Q))上相消干涉。实验中两只量子级联激光器功率分别为 190 mW 和 140 mW,相干合束后输出功率为 290 mW,合束效率达到 85%,快慢轴光束质量分别为 $M_y^2 < 1.4$ 和 $M_x^2 < 1.3$ 。采用迈克尔逊腔对量子级联激光器进行相干合束不仅提高了量子级联激光器的输出功率,而且解决了腔内光束参数控制的问题,合束效率和光束质量都很高,但此方

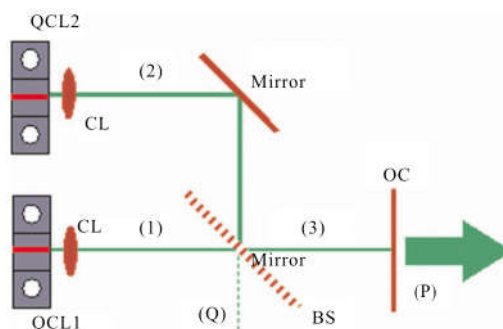


图 1 量子级联激光器迈克尔逊腔相干合束示意图^[17]
Fig.1 Coherent beam combining schematic diagram of quantum cascade lasers in Michelson cavity^[17]

法仅可以实现两个器件合束,难以进一步提高功率。

为了突破中红外半导体激光器相干合束系统中合束单元数量的限制,2011 年 Bloom 等人设计了一种采用二元相位达曼光栅作为合束器的相干谐振腔,实现了 5 支 4.65 μm 波长量子级联激光器的被动相干合束^[18]。实验原理如图 2 所示。与采用迈克尔逊谐振腔相同,此方案中用于相干合束的量子级联激光器前腔面镀减反膜($R < 2\%$),后腔面镀高反膜。由于量子级联激光器产生的激光发散角较大,因此 5 束激光分别经准直镜准直后入射到达曼光栅上。实验中用到的达曼光栅衍射效率为 75%,5 束中红外激光在达曼光栅中心叠加衍射后合成一束,再入射到输出耦合镜上。量子级联激光器的后腔面与输出耦合镜之间形成谐振腔,确保不同激光束之间的相位锁定,选择出合适的纵模后在输出端(对应于达曼光栅的零阶)形成相长干涉,并且在达曼光栅其他阶上形成相消干涉(图 2 中虚线部分)。

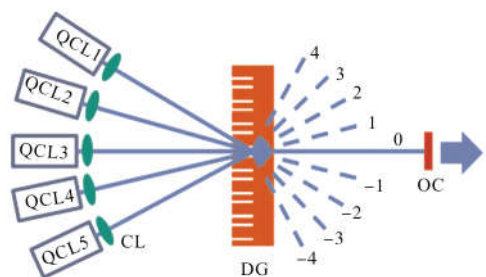


图 2 采用达曼光栅进行量子级联激光器相干合束示意图^[18]

Fig.2 Coherent beam combining schematic diagram of quantum cascade lasers by using Damann grating^[18]

为了提高达曼光栅的合束效率,谐振腔中的达曼光栅前后面都需要镀上增透膜,并且确保谐振腔中 5 个量子级联激光器输出功率大小相同。实验中通过控制输入电流,使得每个激光器的连续输出功率都为 150 mW。5 个量子级联激光器经过被动外腔相干合束后,连续输出功率为 500 mW,合束效率 66%。此相干合束方法在提高中红外半导体激光器功率的同时没有降低其光束质量。相干合束后光束在快慢轴方面的光束质量分别为 $M_y^2 < 1.6$ 和 $M_x^2 < 1.2$,与合束前单元器件的光束质量($M_y^2 = 1.5$ 和 $M_x^2 = 1.2$)相当。

中红外半导体激光器相干合束技术不仅能提高功率,而且可以获得接近单元器件的光束质量,因此

可以显著提高中红外半导体激光器的亮度。相干合束的难点在于如何控制激光单元器件光参数,使得输出光束参数满足光束在远场能够相长干涉。相干合束一般是使用单管激光器作为激光源,理论上可相干耦合无限个激光单元,同时保证激光近衍射极限输出。但是,相干合束对合束激光单元的光谱和偏振等特性要求严格,并且需要对每个合束单元的相位进行严格控制。因此,随着激光合束单元的增加,相干合束系统复杂程度急剧上升。对于现阶段获得高功率中红外输出光源困难较大。

2 中红外半导体激光器光谱合束

激光光谱合束技术是 2000 年由美国 MIT 林肯实验室提出的,其原理是将 N 束不同波长的激光通过波长合束器合成一束。在理想情况下,该过程可以将激光的功率变为单束激光的 N 倍,而激光光束质量却与单束激光相同,从而将激光光束亮度变为原来的 N 倍。目前,大多数用于激光合束的合束器都是采用光栅,通过光栅的逆效应,将不同波长的激光合成一束。经过近二十年的发展,光谱合束技术在近红外半导体激光器领域发展比较成熟。目前,近红外波段半导体激光器通过光谱合束技术输出功率可达 4 680 W,光束质量为 BPP 值,为 3.5 $\text{mm} \cdot \text{mrad}$ ^[19]。

虽然光谱合束技术在近红外半导体激光器领域应用比较成熟,但是第一支用于光谱合束技术的半导体激光器却是激射波长为 2.05 μm 的碲化物量子阱中红外半导体激光器。2000 年 MIT 林肯实验室 Daneu 等人首次采用光栅-外腔光谱合束的方法^[20],进行 2.05 μm 波段碲化物量子阱激光器阵列光谱合束。实验原理如图 3 所示。

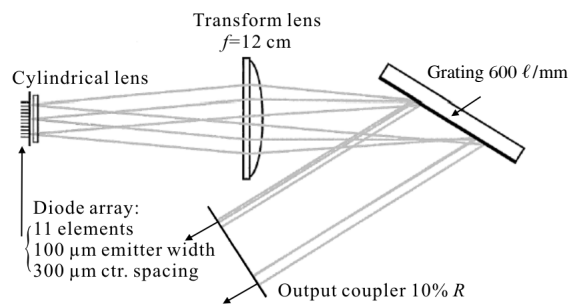


图 3 碲化物量子阱激光器线阵光谱合束示意图^[20]

Fig.3 Spectral beam combining schematic diagram of antimonide quantum well laser array^[20]

用于光谱合束的铟化物中红外半导体激光器线阵含有 11 个发光单元,线阵后腔面镀高反膜,前腔面镀减反膜($R < 0.2\%$)。每个激光单元后腔面与输出耦合镜(Output coupler)之间形成谐振腔。变换透镜(Transform lens)的作用是将线阵上不同激光单元的位置差异转换成不同的入射角汇聚到光栅(Grating)上。衍射光栅将各个入射角不同的光束以相同的出射角反射到输出耦合镜上,再由输出耦合镜将衍射光部分反射并沿原路返回。每个单元激光的起振波长严格满足光栅衍射方程,通过外腔反馈确保将半导体激光器阵列的发光单元分别锁定在不同的波长上。最后利用衍射光栅的分光特性将各个入射角不同、波长不同的光束沿同一方向衍射合成一束。他们在实验中采用反射率分别为 4%、10%、20%的反射镜作为输出耦合镜。研究表明,采用反射率为 10%的反射镜作为输出耦合镜得到的输出功率最大,约为 1.9 W,光束质量 M^2 约为 20,合束效率 50%。随后,半导体激光器光谱合束技术在近红外半导体激光器领域得到了快速发展和广泛应用^[21-24]。

然而由于中红外半导体激光器单元器件发散角大,光学元件不普及,合束过程中热管理困难等因素,在之后很长一段时间中红外半导体激光器光谱合束研究在国内外都没有继续开展。直到 2009 年随着量子级联激光器的发展,德国和美国同时开展了量子级联激光器光谱合束研究^[25-29]。

2009 年德国弗劳恩霍夫应用固体物理研究所 Hugger 等人采用含有 8 个激光单元的量子级联激光器线阵进行光谱合束^[27]。激光器在室温条件下脉冲工作,激射波长 4.6 μm 。实验原理跟图 3 所示相同。实验中他们采用镀增透膜的非球面透镜作为傅里叶变换透镜。为了提高光栅衍射效率在光栅与变换透镜之间插入了半波片,用来改变激光光束偏振态。合束前的光斑如图 4 中插图(a)所示,8 个激光光斑在水平方向排列,慢轴尺寸非常大。如图 4 中插图(b)所示,经过光谱合束后光斑合成一束,慢轴方向光斑尺寸显著缩小,亮度提高。同时,从图 4 合束后的光谱中可以看出,参与合束的 8 个激光单元在不同的波长下锁定,锁定的波长间隔满足光栅方程。通过光谱合束技术,量子级联激光器功率提高了 4 倍,合束

效率大于 50%,合束后光束质量 $M^2=1.5$,与单元器件光束质量相近。2010 年,Hugger 等人又将另一种具有大尺寸光波导结构的量子级联激光器线阵用于光谱合束^[29]。用于光谱合束的激光器线阵含有 6 个激光单元,合束后的激光器室温条件下峰值输出功率为 20 W,光束质量接近衍射极限。

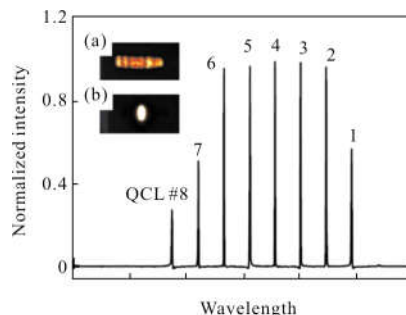


图 4 量子级联激光器光谱合束后光谱^[27]

Fig.4 Spectrum of quantum cascade lasers by spectral beam combining^[27]

在德国弗劳恩霍夫应用固体物理研究所开展量子级联激光器光谱合束研究的同时,美国 Maxion 公司和美军研究实验室合作开展了多只激射波长为 4.9 μm 的量子级联激光器光谱合束研究,目的是用于红外光电对抗^[28]。他们采用的光谱合束结构与传统光谱合束结构相同,包含傅里叶变换透镜、衍射光栅和输出耦合镜。由于量子级联激光器发散角较大,所以在合束之前采用 ZnSe 非球面透镜对光束进行准直。因为增益带宽限制,他们最多只能将 4 支量子级联激光器进行光谱合束,合束后输出功率为 760 mW,光束质量 $M^2=3.07$ 。研究表明,如果想要将更多的量子级联激光器进行光谱合束,最直接的方法是在激光器线阵结构上减小各发光单元的间隔。

同时,2009 年美国哈弗大学与 MIT 林肯实验室也合作开展了激射波长为 9.0 μm 的量子级联激光器光谱合束研究^[25]。实验中用于合束的量子级联激光器为含有 28 个激光单元的分布反馈布拉格量子级联激光器(DFB-QCL)阵列。DFB-QCL 器件结构中的分布反馈布拉格结构可用于波长选择,所以此类量子级联激光器光谱合束结构不需要输出耦合镜,因此为“开环”光谱合束结构。实验中,他们用焦距为 250 mm 的 ZnSe 透镜作为变换透镜。衍射元件为周期 750 线/cm、闪耀波长为 12 μm 的闪耀光栅。光谱合束后光束质量相比于非光谱合束提高了

21 倍,合束效率达到 55%。“开环”光谱合束结构可以将多个激光单元合成一束,但是激光器输出波长的选择依赖于激光器内部分布反馈布拉格结构,对于激光器的选择增加了困难。同时由于衍射光栅的非线性色散,输出光束的指向误差较大(3 倍于激光器发散角)。为了缩小“开环”光谱合束带来的指向误差,MIT 林肯实验室在“开环”光谱结构中引入第二块光栅消除第一个光栅的色散现象^[26],结构示意图如图 5 所示,使得输出光束指向误差仅为发散角的 13%。

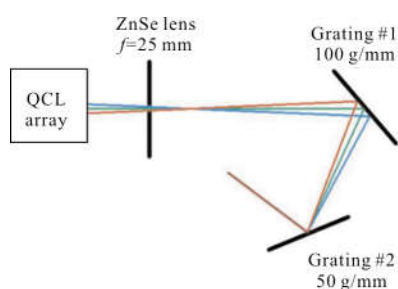


图 5 量子级联激光器双光栅光谱合束示意图^[26]

Fig.5 Spectral beam combining schematic diagram of quantum cascade lasers by using dual-gratings^[26]

中红外半导体激光器光谱合束相比于相干合束优点在于可用于合束的单元器件数量增加,合束功率明显提高。但是由于不同激光单元通过外腔反馈锁定在不同波长,所以输出光束谱宽相比于相干合束谱宽较大,光束质量较低。

3 中红外半导体激光器偏振合束

2008 年,在相干合束和光谱合束还没有应用于量子级联激光器之前,为了提高量子级联激光器的功率,德国弗劳恩霍夫应用固体物理研究所 Wagner 等人将两支激光波长为 4.5~5 μm 的量子级联激光器进行了偏振合束^[30]。量子级联激光器偏振合束示意图如图 6 所示。合束元件为硅基布鲁斯特偏振片。量子级联激光器偏振合束效率达到 82%,18% 的损失主要来自于偏振合束器的反射损失。合束后的光束质量接近衍射极限, $M^2 < 2$ 。

中红外半导体激光器偏振合束合束效率高,但是合束单元器件数量受到限制,只能实现两个激光单元偏振合束。而且,中红外半导体激光器偏振合束器目前还没有实现商品化,需要特殊定制,成本比较高。

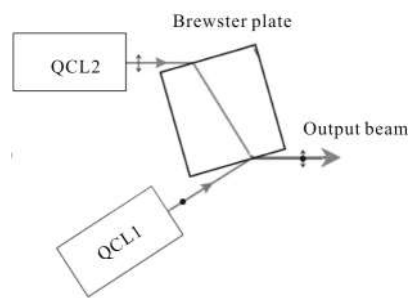


图 6 量子级联激光器偏振合束示意图^[30]

Fig.6 Polarization beam combining schematic diagram of quantum cascade lasers^[30]

4 中红外半导体激光器波导合束

波导合束是基于光的全反射机理来对光路进行限制,它是在衬底片上通过精密刻蚀技术制备光波导结构,不同光束在波导结构中传播,受到波导结构控制最终合成一束输出。2016 年,英国 Elder 等人设计制备了用于中红外半导体激光器合束的空心波导合束结构^[31],如图 7 所示。实验中,他们将 3 支量子级联激光器和 1 支 Ho:YAG 固体激光器通过空心波导合束结构合成一束激光输出。3 支量子级联激光器的激光波长分别为:3.95、4.05、4.60 μm ,最大输出功率分别为:0.16、1.04、1.03 W。Ho:YAG 固体激光器的激光波长为 2.10 μm ,最大输出功率 2 W。在 2~5 μm 波段范围空心波导的透过率为 93%,合束后获得了 4.2 W 近衍射极限功率输出。

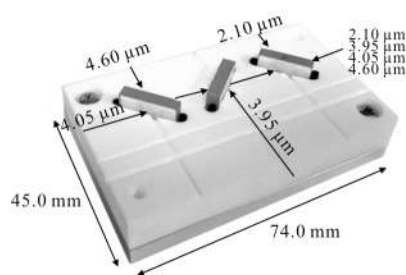


图 7 中红外半导体激光器波导合束示意图^[31]

Fig.7 Waveguide beam combining schematic diagram of mid-infrared semiconductor lasers^[31]

中红外半导体激光器波导合束技术合束谱宽大,在一个波导结构上可实现 2~5 μm 波段范围内多个中红外半导体激光器合束。但是波导合束结构制备工艺复杂,要求精度高,实现中红外半导体激光器更大功率输出难度比较大。

5 中红外半导体激光器空间合束

我国由于受中红外半导体激光器合束单元器件性能限制,开展中红外半导体激光器合束技术较晚。2013 年中国科学院长春光学精密机械与物理研究所与中国科学院半导体研究所合作开展了激光波长为 $4.6\ \mu\text{m}$ 的量子级联激光器空间合束研究^[32]。实验中,采用非球面透镜对激光器快慢轴进行准直,然后采用传统的台阶式空间合束结构,利用光斑高度差将两束光斑在空间上合成一束。合束后激光器峰值功率为 $2.3\ \text{W}$,最大合束效率为 89% ,光束质量 $M^2 < 5$ 。这种台阶式空间合束方法结构简单,合束效率高。但是量子级联激光器发热量非常大,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。2015 年,为保证量子级联激光器件在室温条件下稳定可靠连续工作,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所改进了量子级联激光器空间合束结构,将激光器件沿纵轴自旋 90° 侧立固定,使其快慢轴方向互换,实现了两支量子级联激光器共水平面空间光谱合束^[33]。此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。合束后光束质量 $M^2 < 2.3$,最大合束效率为 85% 。

2017 年中国科学院半导体研究所将 4 支量子级联激光器通过空间合束后进行外腔锁定,实验结构示意图如图 8 所示^[34]。量子级联激光器后腔面镀高反膜,经准直镜准直后由反射镜反射后将光束在空间上合成一束。插入半波片的作用是改变中红外激光的偏振态,提高光栅的衍射效率。激光束经光栅

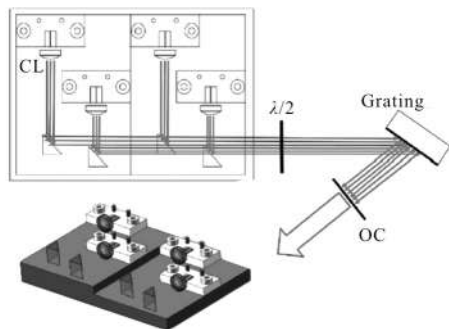


图 8 量子级联激光器空间合束与外腔相结合结构示意图^[34]

Fig.8 Spatial beam combining with external cavity schematic diagram of quantum cascade lasers^[34]

衍射后到达反射率为 40% 的输出耦合镜。输出耦合镜与量子级联激光器后腔面之间形成谐振腔,激光在谐振腔谐振锁定波长后从输出耦合镜激射输出。合束后,锁定波长为 $4.7\ \mu\text{m}$,最大连续输出功率为 $0.64\ \text{W}$,合束效率为 35% ,光束质量 $M^2=5.5$ 。此合束结构是在空间合束基础上引入了外腔结构,包括半波片、光栅和输出耦合镜,实现了 4 支合束单元器件合束后在同一波长锁定,合束后光谱线宽为 $3\ \text{nm}$ 。

中红外半导体激光器空间合束技术与其他合束技术相比可以比较容易地获得较高的合束效率,从而最大程度降低功率损失。但是由于受到空间结构限制,合束后光束质量相比于合束单元器件光束质量会显著变差。

6 结论与展望

目前,用于中红外半导体激光器合束的技术主要有:相干合束、光谱合束、偏振合束、波导合束和空间合束。中红外半导体激光器空间合束技术方法最简单,对合束器件要求低,合束效率高,但是合束后光束质量会明显变差。中红外半导体激光器偏振合束技术结构最简单,同样具有高的合束效率,但是合束单元器件数量受到限制,只能实现两个激光单元偏振合束,不能实现大功率合束。波导合束技术对于波导合束结构制备工艺要求很高,随着合束单元器件的增加,波导合束结构制备难度明显增大,同样不适合更多单元器件合束。相干合束技术不仅能提高中红外半导体激光器的功率,而且可以获得接近单元器件的光束质量,其难点在于如何控制激光单元器件光参数,使得输出光束参数满足光束在远场能够相长干涉。因此,随着激光合束单元的增加,相干合束系统复杂程度急剧上升。对于现阶段获得高功率中红外输出光源困难较大。中红外半导体激光器光谱合束技术与相干合束相比,优点在于合束技术难度小,可用于合束的单元器件数量增加,合束功率明显提高。与空间合束、偏振合束和波导合束相比,在可实现多激光单元合束的同时,可获得更高的光束质量。

综上所述,在中红外半导体激光器合束技术中,空间合束光束质量差,偏振合束、波导合束和相干合束在合束单元器件数量上受到限制,输出功率不高。

光谱合束通过合束光学元件制备技术和高效热管理技术的改进,是最有可能实现中红外半导体激光器高功率、高光束质量激光输出的合束技术。

参考文献:

- [1] Scholle K, Fuhrberg P, Koopmann P, et al. 2 μm Laser Sources and Their Possible Applications [M]. New York: InTech Open Access Publisher, 2010.
- [2] Sijan A. Development of military lasers for optical countermeasures in the mid-IR [C]//SPIE, 2009, 7483: 748304.
- [3] Choi H K, Eglash S J. High-power multiple-quantum-well GaInAsSb/AlGaAsSb diode lasers emitting at 2.1 μm with low threshold current density [J]. *Applied Physics Letters*, 1992, 61(10): 1154-1157.
- [4] Shu S L, Tong C Z, Wang L J, et al. Progress of optically pumped GaSb based semiconductor disk laser [J]. *Opto-Electronic Advances*, 2018, 1(2): 170003.
- [5] Kim G, Shterengas L, Martinelli R U, et al. High-power room-temperature continuous wave operation of 2.7 and 2.8 μm In (Al)Ga AsSb/GaSb diode lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(10): 1926-1928.
- [6] Donetsky D, Kipshidze G, Shterengas L, et al. 2.3 μm type-I quantum well GaInAsSb /AlGaAsSb/GaSb laser diodes with quasi-CW output power of 1.4 W [J]. *Electronics Letters*, 2007, 43(15): 810-811.
- [7] Vizbaras K, Amann M C. Room-temperature 3.73 μm GaSb -based type-I quantum -well lasers with quaternary barriers [J]. *Semiconductor Science & Technology*, 2012, 27(3): 032001.
- [8] Faist J, Capasso F, Sirtori C, et al. Vertical transition quantum cascade laser with Bragg confined excited state[J]. *Applied Physics Letters*, 1995, 66(5): 538-540.
- [9] Beck M, Hofstetter D, Aellen T, et al. Continuous wave operation of a mid-infrared semiconductor laser at room temperature[J]. *Science*, 2002, 295(5553): 301-305.
- [10] Bai Y, Bandyopadhyay N, Tsao S, et al. Highly temperature insensitive quantum cascade lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(24): 251104.
- [11] Faist J, Cappasso F, Sivco D L, et al. Short wavelength ($\lambda=3.4 \mu\text{m}$) quantum cascade laser based on strained compensated InGaAs/AlI [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 72(6): 680-682.
- [12] Evans A, Nguyen J, Slivken S, et al. Quantum-cascade lasers operating in continuous-wave mode above 90 $^{\circ}\text{C}$ at λ similar to 5.25 μm [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(5): 051105.
- [13] Faist J, Capasso F, Sivco D L, et al. Quantum cascade laser [J]. *Science*, 1994, 264(5158): 553-556.
- [14] Bai Y, Slivken S, Kuboya S, et al. Quantum cascade lasers that emit more light than heat [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(2): 99-102.
- [15] Liu P Q, Hoffman A J, Escarra M D, et al. Highly power-efficient quantum cascade lasers [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(2): 95-98.
- [16] Bai Y, Bandyopadhyay N, Tsao S, et al. Room temperature quantum cascade lasers with 27% wall plug efficiency [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(18): 181102.
- [17] Bloom G, Larat C, Lallier E, et al. Coherent combining of two quantum-cascade lasers in a Michelson cavity [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(11): 1917-1919.
- [18] Bloom G, Larat C, Lallier E, et al. Passive coherent beam combining of quantum-cascade lasers with a Damman grating [J]. *Optics Letters*, 2011, 36 (9): 3810-3812.
- [19] Huang R K, Chann B, Burgess J, et al. TeraDiode's high brightness semiconductor lasers [C]//SPIE, 2015, 9730: 97300C.
- [20] Fan T Y, Sanchez A, Daneu V, et al. Spectral beam combining of a broad-stripe diode laser array in an external cavity[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(6): 405-407.
- [21] Vijayakumar D, Jensen O B, Thestrup B, et al. Wavelength beam combining of a 980 nm tapered diode laser bar in an external cavity [C]//SPIE, 2010, 7720: 77201U.
- [22] Huang R K, Missaggia L J, Chann B, et al. High-brightness wavelength beam combined semiconductor laser diode arrays [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(4): 209-211.
- [23] Montoya J, Augst S J, Creedon K, et al. External cavity beam combining of 21 semiconductor lasers using SPGD [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(11): 1727-1728.
- [24] Müller A, Vijayakumarole D, Jensen O, et al. Spectral beam combining of diode lasers with high efficiency [C]//Lasers, Sources, and Related Photonic Devices Technical Digest OSA, 2012: AM4A 10.
- [25] Lee B G, Kinsky J, Goyal A K, et al. Beam combining of quantum cascade laser arrays [J]. *Optics Express*,

- 2009, 17(18): 16216–16224.
- [26] Goyal A K, Spencer M, Shatrovov O, et al. Dispersion-compensated wavelength beam combining of quantum-cascade-laser arrays [J]. *Optics Express*, 2011, 19(27): 26725–26732.
- [27] Hugger S, Fuchsa F, Aidama R, et al. Spectral beam combining of quantum cascade lasers in an external cavity [C]//SPIE, 2009, 7325: 73250H.
- [28] Bradshawa J L, Toberbjohn R L, Brunoa D, et al. Wavelength beam combined quantum cascade lasers for IRCM [C]//SPIE, 2009, 7325: 73250K.
- [29] Hugger S, Aidam R, Bronner W, et al. Power scaling of quantum cascade lasers via multiemitter beam combining [J]. *Optics Express*, 2010, 49(11): 111111.
- [30] Wagner J, Schulz N, Rösener B, et al. Infrared semiconductor lasers for DIRCM applications [C]//SPIE, 2008, 7115: 71150A.
- [31] Eldera I F, Thornea D H, Lamba A R, et al. Mid-IR laser source using hollow waveguide beam combining [C]//SPIE, 2016, 9726: 972601.
- [32] Wu H, Wang L J, Peng H Y, et al. High efficiency beam combination of 4.6 μm quantum cascade lasers [J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(9): 091401.
- [33] Wu H, Shu S L, Ning Y Q, et al. High-efficiency beam combination of continuous-wave quantum cascade lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42 (7): 0702005. (in Chinese)
- [34] Zhao Y, Zhang J C, Zhou Y H, et al. External-cavity beam combining of 4-channel quantum cascade lasers [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 85: 52–55.