

·激光技术·

激光对抗系统中的中红外激光源及其关键技术

李森森, 闫秀生

(光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308)

摘要:介绍了激光对抗系统中的几类中红外3~5 μm 波段的激光光源,包括固体光参量振荡激光器,掺杂光纤激光器,光子晶体光纤激光器和量子级联激光器。从激光输出能力、自身质量、光束质量等方面对比分析了各自的特点,并指出了现阶段激光光源应用于机载平台所需要解决的关键技术。

关键词:中红外激光器;激光对抗;量子级联激光器

中图分类号:TN219

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2018)-05-0019-05

Research on Mid-infrared Laser Source in Laser Countermeasure System and Key Technology

LI Sen-sen, YAN Xiu-sheng

(Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Tianjin 300308, China)

Abstract: Mid-infrared laser sources in laser countermeasure systems at 3~5 μm are introduced, including solid optical parametric oscillation lasers, doped fiber lasers, photonic crystal fiber lasers and quantum cascade lasers. Based on laser output, weight and beam quality, the characteristics of these lasers are analyzed. And the key technologies used in airborne platform to be resolved are pointed out.

Key words: mid-infrared laser; laser countermeasure; quantum cascade laser

无源定位、跟踪、火力引导是电磁频谱战相关技术的重要组成部分。针对红外搜索与跟踪的对抗技术,需要开展相应的激光光源技术。中红外波段3~5 μm 是非常重要的窗口,是光学技术中非常重要的波段,广泛地应用红外搜索与跟踪、空间技术、遥感等方面。而发射光谱为3~5 μm 的中红外激光器在光电对抗方面更有着重要的应用,可用其来干扰红外制导导弹,保护目标免受打击^[1]。中红外波段的激光光源是激光对抗系统中重要组成部分。

目前,能够产生中红外波段的光源主要包括固体光参量振荡激光器^[2],掺杂光纤激光器^[3],中红外超连续谱光源和量子级联激光器^[4-5]等。它们各有特点,下面将从输出能力,输出光束质量等方面对比分析。

1 中红外激光光源

自由电子激光器:自由电子激光器简单来说就是使用“自由电子”作为激光介质的激光器,是利用相对论电子束通过一个称为摇摆器的周期变化的横向磁感应场来与电磁辐射相互作用产生激光的装置。其优点如下:(1)输出功率高。由于相对论电子束有很高的功率密度,工作介质又是自由电子,不存在击穿问题,因此自由电子激光器能产生很高的功率。(2)波长可调谐。自由电子激光器输出波长与电子束能量有关,容易连续调谐,工作的频率范围可以很宽,从厘米到纳米波段。(3)转换效率高。电子动能直接转换为激光,电子可重复利用,重复利用率达95%以上。(4)光束质量高。工作介质为电子,比较均匀,没有热畸变的问题。不足

收稿日期:2018-09-16

作者简介:李森森(1987-),男,博士,主要从事中红外激光技术应用、高功率激光系统光束整形技术研究。

的是,自由电子激光器体积庞大,价格昂贵,结构复杂,需要电子加速器和摇摆器阵列。Los Alamos 实验室开发的先进自由电子激光器(AFEL)占地面积 $12.16\text{ m}\times 21.28\text{ m}$,主要有控制室、激光室和拱顶室组成。

气体激光器:气体激光器是指以气体或蒸汽作为激光工作介质的激光器。优点是:(1)光束质量好。均匀性比固体好,易获得接近衍射极限的高斯光束。(2)输出功率高。损伤阈值高。不足之处在于:结构复杂,体积庞大,大多数气体激光器工作物质有毒或腐蚀性较大。气体工作介质的例子密度远小于固体介质,必须增大体积提高输出激光功率。输出光谱位于中红外波段的有卤化氢(包括其同位素,如 HF、DF、HCl 等)气体激光器($2.6\sim 6.4\ \mu\text{m}$),其抽运源来自于化学反应释放的化学能,也称为化学激光器。在高压横向放电激励下,典型的中红外波段输出激光波长为: $3.7\sim 4.2\ \mu\text{m}$ (DF), $3.5\sim 4.2\ \mu\text{m}$ (HCl)和 $4\sim 4.6\ \mu\text{m}$ (HBr)。

CO₂激光倍频:倍频激光器利用远红外脉冲 CO₂ 激光器倍频产生 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 激光。能够用于 CO₂ 激光器倍频的晶体很多,晶体匹配方式分 BPM 和 QPM 两种,具体包括 Te, Ag₃AsS₃, AgGaS₂, LiInSe₂, GaAs 和 ZnSe 等多种,其中 AgGaSe₂ 能获得大尺寸单晶且红外波段透过率高,是目前国内外研究最多的倍频晶体。目前,可选择的 CO₂ 激光器包括 TEA CO₂ 激光器和射频 CO₂ 激光器,其中,利用 TEA CO₂ 激光器开展倍频技术研究的较多,其主要优点是峰值功率高,缺点则是系统结构复杂,体积大。而射频体制的 CO₂ 激光器体积相对较小,效率高。优点:(1)CO₂ 激光器输出激光功率大、效率高,电光转换效率能够超过 30%;(2)光束质量好,激光相干性好,工作稳定,能实现单模运转;(3)可实现 $4.7\ \mu\text{m}$ 和 $9.4\ \mu\text{m}$ 波段同时输出。不足之处是体积质量大。

固体掺杂中红外激光器:晶体中掺杂离子的方法是在增益介质中掺杂不同的杂质,利用杂质离子相应的能级跃迁来实现中红外波段的激光输出,从而产生中红外光源。其中,尤其是随着激光透明陶瓷技术的不断突破,使得掺杂离子方法受到越来越多的关注。固体激光器是以掺杂的玻璃、晶体或透明陶瓷等固体材料为工作物质的激光器。固体激光器具有结构紧凑、小巧、牢固、灵活等优点,但由于掺杂离子的限制,固体激光器的输出波长多数在

$1\sim 2\ \mu\text{m}$ 范围内,中红外固体激光技术一直以来发展缓慢。近年来,人们发现了可以直接发出中红外激光的工作物质,如过渡族元素掺杂二元或三元硫族化合物和 Dy³⁺:PbGa₂S₄(Dy:PGS)晶体,大大促进了固体中红外激光器的发展。Fe:ZnSe 在人们非常感兴趣的 $4\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段附近有较强的辐射能力。目前已经可以实现平均功率十瓦级和单脉冲能量百毫焦耳的中红外激光输出。使用 Fe:ZnSe 输出 $4.3\ \mu\text{m}$ 激光的主要问题是随温度升高效率严重降低以及难以获得高性能的 $3\ \mu\text{m}$ 泵浦源。Dy:PGS 是一种非常优秀的常温中红外激光工作物质,Dy³⁺ 具有宽的吸收谱带,且位于容易得到泵浦源的短波。目前已能实现在 $4.3\ \mu\text{m}$ 输出功率高达 160 mJ。并且在没有任何制冷条件下,在 $4.3\ \mu\text{m}$ 输出接近高斯分布的激光束,斜率效率高达 8%。

固体光参量振荡激光器(optical parametric oscillator, OPO):依靠改变激光波长的光参量调谐技术而制作的激光器为光参量振荡器。光参量调谐技术可转换得到半导体激光器、气体激光器等传统激光器无法达到的波段范围。随着各种新型非线性晶体的出现,中红外光参量振荡器的研究也得到了快速发展,目前到为止,能够用于中红外光参量振荡器的晶体有 LiNO₃, LiIO₃, KTP, ZGP 和 AgCaS₂ 等。相关文献记载,ZGP 晶体在 $2\sim 12\ \mu\text{m}$ 波段内,透过率高和导热性好,且具有较高的非线性系数,因此 ZGP 成为国内外获得中波红外激光的最佳材料。近年来,人们对直接泵浦和级联泵浦 ZGP OPO 的研究取得了巨大进展。其中,2010年,用 Ho:YAG 作为直接泵浦的 ZGP OPO 结构在 $3.06\sim 6.6\ \mu\text{m}$ 和 $4.72\ \mu\text{m}$ 波段分别获得了 1.44 W 和 2 W 的平均功率。目前,在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段范围内,使用 ZGP OPO 结构产生中红外激光,其输出功率最大在 13 W 左右。如果 ZGP OPO 与光参量放大器配合使用可进一步增加激光器输出功率。现阶段,许多研究机构投身于光参量调谐技术的研究,此技术具有越来越广阔的发展前景并将在其应用领域中发挥出更大的作用。

固体拉曼激光器:拉曼散射主要由介质的三阶非线性效应引起的。当泵浦光子与物质相互作用时,产生散射光的同时放出或吸收一个声子,对应的拉曼散射称为斯托克斯散射或反斯托克斯散射。拉曼散射的输出波长与泵浦光波长有关,当泵

浦光入射到拉曼晶体后,会产生频移即一阶斯托克斯光;当一阶斯托克斯光达到一定的强度时,就作为二阶斯托克斯散射的泵浦光,产生二阶斯托克斯光,以此类推,该过程称为级联受激拉曼散射。将硅做成波导后,采用不同的泵浦波长可实现不同波段的中红外激光输出。如采用宽波段可调谐CrCdSe激光(2~3.5 μm),可实现2.23~4.2 μm 的一阶拉曼激光输出。特点:(1)脉宽较窄,可获得纳秒、皮秒甚至飞秒激光。(2)光束质量好。不足之处:(1)固体拉曼激光目前技术不够成熟。所需泵浦源比较困难。(2)波长一般在3 μm 附近,获得3~5 μm 难度大,能量小,最高为瓦级。

掺杂光纤激光器:中红外光纤激光器使用掺有稀土元素的光纤作为增益介质。其工作原理为,当泵浦源发出的泵浦光耦合到增益介质内以后,掺杂有稀土元素的光纤将会吸收此泵浦波长上的光子而形成具有反转效应的光学粒子,通过谐振腔镜的反馈和振荡作用将受激发射的光波形成激光而输出。中红外光纤激光器具有体积小、光束质量好、转换效率高、散热效果好,易于实现和光纤的耦合的优点,且近年来在激光器中的光纤材料、掺杂浓度和制作工艺等方面的研究取得了很大的进展,但是现阶段中红外光纤激光器的研究中待解决问题还较多,提纯工艺水平、稀土离子浓度的提取等技术还不成熟。

中红外超连续谱激光:窄带激光入射到非线性介质中,一般在光纤和光子晶体光纤中,在强烈的非线性效应作用下,出射光频谱得到了极大展宽,形成了光谱连续分布的光谱,即超连续谱。超连续谱的产生源于光纤中的非线性效应和色散效应共同作用,包括自相位调制,交叉相位调制,拉曼散射,调制不稳定性,孤子分裂,色散波等作用。超连续谱覆盖中红外波段即可作为光电对抗光源。目前国际上的中红外超连续谱的水平,在2011年,在ZBLAN光纤中产生1.9~4.5 μm 波段的超连续谱,总输出功率2.6 W,其中3.8 μm 以上频谱成分占0.7 W。目前硫系光纤,碲化物微结构光纤,ZBLAN光纤中产生中红外超连续谱的研究处在实验阶段,功率水平需要进一步提高,光电对抗的效果尚需验证。

量子级联激光器:量子级联激光器是基于导带子带间电子跃迁和声子共振辅助隧穿实现粒子数

反转。利用分子束外延(MBE)技术生长超薄层半导体材料而对其电子能级、波函数及能带结构实施的量子工程,使人们能够在远大于原子尺度的介观尺度(1~100 nm)上观察到量子现象,其发明是超晶格、量子阱波函数能带工程与单原子层分子束外延及界面质量控制相结合的成功典范。量子级联激光器输出波长由有源区阱层和垒层的厚度决定而与材料带隙无关,理论预测可覆盖几个微米至250 μm 以上很宽的波长范围。QCL的级联效应允许一个电子产生多个光子,其光子数目等于QCL的级数,由此提高了量子效率。利用量子级联激光器产生中红外波段激光是目前的研究热点。尤其是随着中红外激光在定向红外对抗系统领域的应用,量子级联激光器更加受到人们重视。自从1994年第一支量子级联激光器诞生于美国Bell实验室后,QCL在防务安全和环境保护等领域的研究迅速展开。在高功率QCL产品应用上,Daylight Solutions Inc公司开发的基于量子级联激光器的JammIR系列激光系统于2011年已经通过环境试验。Daylight Light Inc已经完成了基于QCL的应用系统在数架直升机平台上的飞行试验,并已通过美国陆军的可靠性检测,展示出了高的技术水平。在2008-2011年之间,Daylight Solutions交付15种QCL机载产品样机,能够实现数瓦级、多波长输出。

对于红外对抗系统采用的光源,量子级联激光器有明显的优势。QCL激光器由于体积小、质量轻,可室温工作,工作波长更适合调谐在中波红外制导武器的峰值工作波段内。目前,QCL激光器技术上已经取得了突破性进展。

2 中红外量子级联激光器关键技术

(1)热管理技术

限制量子级联激光器输出功率的主要是由于散热的问题。量子级联激光器体积小,整体大小在2 mm左右,厚度仅为100 μm ,安装热沉上。量子级联激光器工作时,产生大量的热,如不及时散掉,会烧坏激光器。热管理包括两个方面,一是量子级联激光器芯片内部,通过优化结构设计实现快速将热量传导到热沉上;二是研究紧凑型高效散热方法,将热沉上积累的热快速传导到系统之外。因此,研究高性能室温相变材料用于量子级联激光器的热

管理是急需解决的问题。

(2) 光束合成技术

对于现有体制的量子级联激光器,光纤激光器来说,受限于热效应和光学损伤,单束输出功率有限,要得到较高功率的激光输出,目前可行的是通过多光束合成技术。目前光束合成的概念是基于包括相干合成,非相干合成,光谱合成等技术。相干合成技术一般是由控制子光束的相位来实现的,分为两类:一类将若干个低功率(能量)的激光束进行大气传输或者多级放大系统后,相干或部分相干叠加,合成一个高功率的激光束;另一类是将低功率(能量)高光束质量的种子光与高功率(能量)光束质量较差的泵浦光合成得到经过净化的高功率(能量)高光束质量的激光。

位相控制的线性和非线性光学方法有耦合光学谐振腔、微透镜列阵、位相光栅和相息板等二元光学器件,相控列阵,能动光学和自适应光学器件,SBS和SRS等,应根据不同使用目的选用不同的器件。非相干合成技术按照基本的技术原理可分为三种:空间叠加技术(spatial multiplexing),偏振耦合技术(polarization multiplexing)和波长耦合技术(wavelength multiplexing)。目前,采用光栅和衍射光学元件(DOE)等实现的波长合束是主流方向^[6-7],典型的光谱合束结构如图1所示。

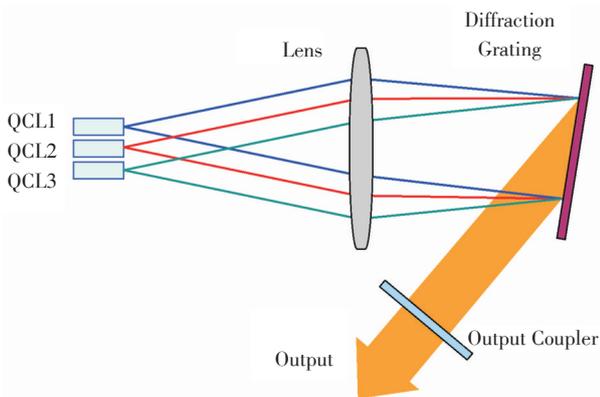


图1 QCL光谱合束结构

(3) 光束质量改善技术

量子级联激光器的产生以能带结构工程学和共振隧穿的发展为基础,其核心结构半导体异质结构由分子束外延技术生长。从材料上来说,量子级联激光器属于半导体激光家族中的一员。半导体

激光器有一个致命的弱点:没有常规的固体激光器的光束质量好。因为半导体激光器的有源区一般是微米量级,激光的发射厚度就是微米量级,出射后相当于单缝衍射,产生很强的衍射效应,光束发散。由于量子级联激光器有源区XY方向的尺寸不一致,导致输出激光存在光场畸变。在高功率量子级联激光器中,可能存在高阶横模。高阶模的成分收到激光器芯片结构的、注入电流、核温度等因素的影响。研究抑制或利用高阶模式的方法,例如通过相位板法将高阶模转换成基模,从而可以进一步增加条宽,提高输出激光功率。

为了提高激光对抗干扰距离,远场光束质量是必须解决的问题。量子级联激光器输出光束质量发散角比较大,典型的QCL激光输出光斑近场如图2所示。

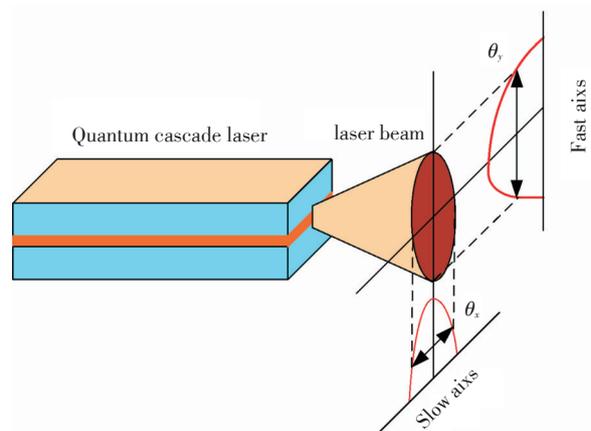


图2 QCL发射激光近场分布图

因此必须突破解决远场光束整形技术,在远距离获得能量比较集中的光斑,才能有效对抗对方目标。

(4) 特种QCL驱动电源技术

量子级联激光器的驱动电源要求高精度、高稳定和高安全性。量子级联激光器抗电冲击能力比较弱,如果驱动电流太大,超出其额定范围,则会将QCL瞬间烧毁,同时,如果驱动电路工作不稳定,也会影响QCL工作,严重的会损坏其内部的元器件,降低其使用寿命。因此驱动电源的过流保护模块是其关键环节。此外驱动电源也是一个发热器件,通过合理的设计使其紧凑可靠也是其中的关键环节。

(5) 光电一体小型化集成封装技术

本质上,光和电是一致的。光是电磁波的一

种,是电磁波在约 100 nm ~ 100 μm 范围内的表现形式。量子级联激光器的光电集成一体化封装技术研究一些为特定任务进行优化的电路和光路结构,通过硬件设计实现光电一体化封装集成。引入模块化设计思想,将各个功能模块分区布局。一个完整的激光源系统包括量子级联激光器芯片、特种驱动电源、温控电路、通信模块、状态监测模块等,考虑将这些模块集成在同一个微型结构中。此外探索其他架构思路,例如可以根据激光发射需求进行调整的可重构物理结构。

3 结 论

综上所述,获得中波红外激光的方法种类繁多,每一种方法都具有鲜明的特点,且按照相应技术制作的中波红外激光器都显示出特有的优势。目前,传统体制的中红外激光器受限于输出功率低,体积庞大,电光转换效率低等方方面面的因素,很难在飞机尤其是无人机上推广应用。因此,研究新体制中红外激光器,实现高功率中红外激光器的微型化和拓展新的波段势在必行。量子级联激光器性能的不断提高,其整体尺寸小,有望在未来机载和无人机载平台上发挥作用。

参考文献

- [1] Bekman H H, Heuvel J C, Putten F J, et al. Development of a mid-infrared laser for study of infrared countermeasures techniques[J]. SPIE, 2005, 5615: 27-38.
- [2] Haakestad M W, Arisholm G, Lippert E. High-pulse-energy mid-infrared laser source based on optical parametric amplification in ZnGeP2[J]. Optics Express, 2008, 16(18): 14263-14273.
- [3] Zhu X S, Jain R. Numerical analysis and experimental results of high-power Er/Pr:ZBLAN 2.7 μm fiber lasers with different pumping designs[J]. Applied Optics, 2006, 45(27): 7118-7125.
- [4] Mujagic E, Schwarzer C, Yao Y, et al. Two-dimensional broadband distributed-feedback quantum cascade laser arrays[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(14): 141101.
- [5] Miriam Serena Vitiello, Giacomo Scalari, Benjamin Williams, et al. Quantum cascade lasers: 20 years of challenges[J]. Optics Express, 2015, 23(4): 5167-5182.
- [6] Bloom G, Larat C, Lallier E, et al. Passive coherent beam combining of quantum-cascade lasers with a Dammann grating[J]. Optics Letters, 36(19): 3810-3812.
- [7] Chann B, Huang R K, Missaggia L J, et al. Near-diffraction-limited diode laser arrays by wavelength beam combining[J]. Optics letters, 30(16): 2104-2106.
- [8] 姜淑君,田晨光,盛新志.新型阶跃纤芯微结构包层抗弯曲大模场面积光纤[J]. 光电技术应用,2018,33(4): 1-8.
- [9] 谭乃悦,许中杰,王睿.基于四透镜光学系统的鬼像形成研究[J]. 光电技术应用,2018,33(1):1-5.
- [10] 连勇.激光无源侦察定位技术研究[J]. 光电技术应用,2018,33(2):4-8.

[1] Bekman H H, Heuvel J C, Putten F J, et al. Development

《光电技术应用》期刊简介

《光电技术应用》期刊是中国电子科技集团公司主管,中国电子科技集团公司光电研究院主办,公开发行的学术性中文科技期刊。以光电系统技术为主要专业特色,传播光电子技术、光电系统应用技术专业领域的先进科技信息,报道新型科技成果,推动工程技术交流,促进行业科技进步与发展。

期刊已成为《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊、《中文科技期刊数据库》收录期刊、《中国期刊全文数据库》全文收录期刊、《中国学术期刊综合评价数据库》统计源期刊、美国《乌利希期刊指南》收录期刊。期刊的影响因子连续几年上升,2015年、2016年、2017年连续三年连续入选《中国学术期刊影响因子年报》统计源期刊。

《光电技术应用》编辑部