

机载定向红外对抗系统的中波红外激光器及关键技术

张元生, 徐亮, 陈方, 边栓成, 蔡猛
(中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000)

摘要:介绍了国外定向红外对抗系统(DIRCM)的中波红外激光器装备的应用情况。依据机载定向红外对抗(DIRCM)系统对中波红外激光的输出功率、光束质量、激光波段、工作温度、体积和重量等指标的需求,分析了不同体制的中波红外激光器在机载DIRCM系统中使用所需解决的关键技术,给出了机载DIRCM系统中波红外激光器发展趋势。

关键词:定向红外对抗系统; 中波红外激光器; 量子级联激光器; 光参量振荡

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2017)05-0056-04

Mid-Infrared Lasers Used in Airborne Directed Infrared Countermeasures System and Its Key Technologies

ZHANG Yuan-sheng, XU Liang, CHEN Fang, BIAN Shuan-cheng, CAI Meng
(Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China)

Abstract: The application of mid-infrared laser of Directed Infrared Countermeasures (DIRCM) system in foreign countries is introduced. Based on the requirements of DIRCM system for mid-infrared laser on such indexes of laser power, beam quality, wavelength, working temperature, volume and weight, the key technologies of different types of mid-infrared lasers used in airborne DIRCM system are analyzed. The development tendency of mid-infrared laser used in airborne DIRCM system is presented in the end.

Key words: directed infrared countermeasures system; mid-infrared laser; quantum cascade laser; optical parameter oscillator

0 概述

保护飞机平台免受红外制导导弹威胁是确保作战任务顺利完成的关键,定向红外对抗(Directed Infrared Countermeasures, DIRCM)作为目前对抗红外制导导弹最有效的手段,一直备受世界各军事大国关注。中波红外激光器作为DIRCM系统的关键组成部分,通过产生激光照射来袭导弹红外导引头使其致盲,在很大程度上决定了能否对导弹成功干扰。

经过几十年的发展,红外制导导弹经历了调制盘型、多元扫描型和面阵凝视成像型等不同阶段,其抗干扰能力不断提升。因此对DIRCM系统的中波红外激光器也提出了更为严格的要求:为了实现数公里外来袭导弹的干扰,需要激光器具有良好的光束质量和

足够(数瓦)的功率,以在远场获得足够高的功率密度;为了实现对不同体制导引头的干扰,需要激光输出波长覆盖导引头工作波段(1~5 μm);为了对抗导引头的反干扰措施,需要激光器具有实时波长调谐能力;为了满足载机对机载设备装机使用限制和在恶劣的自然环境下使用,需要激光器能够在宽温域(120℃)范围内工作,同时要求具有较小的体积、重量和功耗。

受以上使用条件的限制,使得能够用于DIRCM系统的中波红外激光器类型十分有限,主要包括固体/光纤激光泵浦光参量振荡激光器(OPO)和量子级联激光器(QCL)等^[1-4]。

1 国外DIRCM系统的中波红外激光器应用

1.1 “毒蛇”激光器

2001年开始研制的AAQ-24(V)“复仇女神”DIRCM系统由美国诺斯罗普·格鲁曼公司开发,广泛装备于美国的C-17, C-130, CV-22和MH-53等平台,有效提高了各型飞机的战场生存能力。“复仇女神”DIRCM系统采

用的激光器为“毒蛇”激光器(见图1),该型激光器采用固体激光泵浦 OPO 方案,能够输出波段 I、波段 II 和波段 VI 高功率激光,每个波段的激光功率分别为 3 W, 2 W 和 5 W。激光器尺寸为 250 mm × 100 mm × 50 mm,重量为 4.15 kg^[5]。

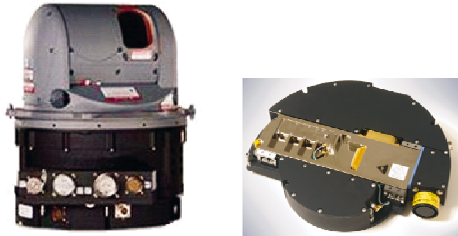


图1 “复仇女神”DIRCM 系统及“毒蛇”激光器

Fig. 1 Nemesis DIRCM system and Viper laser

1.2 TYPE 160 激光器

“狮头战神”DIRCM 系统由英国 Selex Galileo 公司开发,采用其自主研发的 TYPE 160 激光器作为光源(见图2),于 2010 年公开报道,该型激光器采用半导体抽运光纤泵浦 OPO 构型,包括一个高功率半导体抽运光纤激光器和一个波长转换装置,可获得多波段中波激光输出。激光器采用模块化设计,其中,泵浦源光纤激光器升级方便,后期可获得更高的中波红外激光输出。激光器尺寸为 245 mm × 175 mm × 68 mm,重量为 4.5 kg^[6]。



图2 “狮头战神”DIRCM 系统及 TYPE 160 激光器

Fig. 2 Miysis DIRCM system and TYPE 160 laser

1.3 Boldstroke 激光器

“果敢行动”(Boldstroke) DIRCM 系统是英国 BAE 系统公司针对美国陆军通用定向红外对抗系统(CIRCM)需求研发的产品,于 2011 年首次公开展示,Boldstroke 的中波红外激光器采用固体激光泵浦 OPO 方案,激光器与跟瞄组件直接耦合,实现激光能量的高效传输,如图3所示。

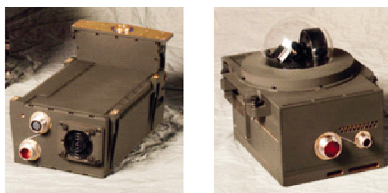


图3 “果敢行动”跟瞄组件及激光器

Fig. 3 Boldstroke DIRCM system and laser

1.4 Solaris 激光器

通用定向红外对抗系统(CIRCM)是一种轻型、低成本、高可靠性的激光对抗系统。2015 年 9 月,美国陆军将通用定向红外对抗系统的工程与制造连同低速率初始生产合同一并授予美国诺斯罗普·格鲁曼公司。诺斯罗普·格鲁曼公司的 CIRCM 系统由英国 Selex Galileo 公司提供的轻型跟瞄组件(ECLIPES)和美国日光防务公司(DayLight Defense)的 Solaris 量子级联激光器组成^[7](见图4)。Solaris 激光器是一款高性能 QCL 激光器,体积较“毒蛇”、TYPE 160 激光器更小,重量更轻,符合 DIRCM 轻小化发展需求。



图4 ECLIPES 跟瞄组件及 Solaris 激光器

Fig. 4 ECLIPES DIRCM system and Solaris laser

2 中波红外激光器关键技术

2.1 固体/光纤激光泵浦光参量振荡器

中波光参量振荡器是利用技术成熟的高功率固体/光纤激光器作为泵浦源,泵浦非线性晶体,实现激光频率的转换,以获得所需要的激光输出。按照所采用的非线性晶体不同,目前已成功应用于 DIRCM 系统的光参量振荡器主要有基于磷锗锌($ZnGeP_2$)晶体的光参量振荡器和基于铌酸锂(PPLN)晶体的光参量振荡器等^[8-11]。

光参量振荡器技术成熟,但系统结构复杂,需要通过多级光参量振荡器或采用特定的泵浦源才能获得中波红外激光输出,造成系统体积大、重量大,热管理较为困难。固体/光纤激光泵浦光参量振荡器关键技术主要包括光参量振荡技术和宽温域高精度温控技术。

2.1.1 光参量振荡技术

光参量振荡器的体积、重量主要受谐振腔体积、重量限制,要想获得体积小、重量轻的光参量振荡器,需要优化谐振腔设计。

目前光参量振荡器的谐振腔主要有两种构型。

1) 两级光参量振荡构型。通过采用 1 μm 激光器作为泵浦源,如 1.06 μm 的钕玻璃激光器。泵浦一级 KTP OPO 或 MgO:PPLN OPO 获得 2 μm 以上光参量输出,进而泵浦二级 ZGP OPO 或 MgO:PPLN OPO,以获得中波红外激光。

2) 一级光参量振荡构型。通过直接采用 2 μm 激光作为泵浦源,如掺 Tm^{3+} 激光器和掺 Ho^{3+} 激光器,直

接泵浦 OPO 获得中波红外激光。

采用构型 1) 设计的激光器较为成熟,但系统的体积和重量较大,采用构型 2) 设计的激光器具有体积小、重量轻的特点,但目前掺 Tm^{3+} 激光器和掺 Ho^{3+} 激光器技术尚不成熟,需要开展深入研究。

2.1.2 宽温域高精度温控技术

由于温度变化会影响光参量振荡器的输出功率和效率,因此需要激光器具有高精度温度控制能力。为确保激光器稳定运行,热管理模块需在完成实时废热排散的同时,满足温度控制精度及其均匀性的要求。在高热流密度、高温(120 °C)差环境下实现高精度温控,关键在于优化控制策略设计,提高控制器件水平。针对器件要求及使用环境,可采用 PID 连锁、串级流量控制策略实现温度精度实时调节。

2.2 量子级联激光器

量子级联激光器与传统的二极管激光器带间能级辐射不同,它是半导体低维结构材料为基础,基于量子工程设计的新原理单极性半导体激光器。量子级联激光器由多级耦合量子阱模块串接组成有源区,可实现单电子注入倍增光子输出而获得高功率激光输出。相比于普通的半导体激光器,量子级联激光器具有输出波长可任意剪裁、器件结构简单、光电转换效率高等特点。

与半导体激光器类似,量子级联激光器同样存在光束质量差、快慢轴发散角不一致等问题,需要经过光束柱整形才能满足机载 DIRCM 系统使用需求。目前制约量子级联激光器在机载 DIRCM 系统中应用的关键技术主要包括高质量材料生长技术和光束整形合束技术等。

2.2.1 高质量材料生长技术

量子级联激光器材料通常采用分子束外延(MBE)技术或金属有机化学气象沉积(MOCVD)技术生长,通过改变材料的类型、组分和掺杂浓度等参数,获得具有特定能带低维材料。

目前研究较多的能够在室温环境下输出高功率中波红外激光的量子级联激光器为 InP 基 InGaAs/InAlAs 材料体系的量子级联激光器,其材料结构如图 5 所示。整个量子级联激光器材料的生长主要由两个部分组成:1) 第一部分生长,有三元化合物 InGaAs, InAlAs 所组成的结构,包括有源/注入/弛豫区的多量子阱结构;2) 第二部分生长,有 InP 材料构成的上、下波导限制层、波导包层和欧姆接触层。

InP 基量子级联激光器材料是利用 MBE 技术在 InP 衬底上生长 InGaAs/InAlAs 异质结构材料体系。由于 InP 基量子级联激光器材料结构一般有 500 多层,

外延层厚达 5 ~ 6 μm ,容易超过材料外延生长的临界厚度,因此其晶格失配度必须控制在 10^{-4} 量级,才能使晶格失配和应力对材料质量的影响降低到最小值。

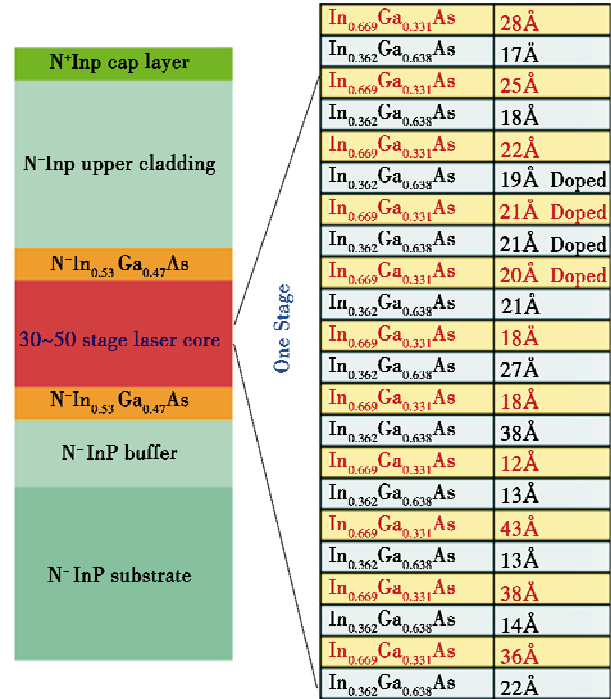


图 5 InP 基 QCL 材料结构

Fig. 5 Material structure of InP based QCL

2.2.2 光束整形合束技术

机载 DIRCM 系统对中波红外激光输出功率有较高的要求,单管量子级联激光器输出功率很难满足,需用通过光束合束技术来提高量子级联激光器的输出功率。根据量子级联激光器的特点,通常采用外腔光谱合束方法来提高激光器输出功率,美国日光防务公司采用外腔光谱合束方法,获得了超过 15 W 的激光输出。外腔光谱合束原理如图 6 所示。

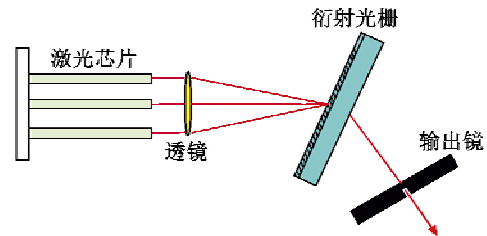


图 6 外腔光谱合束量子级联激光器结构示意图

Fig. 6 Schematic of external-cavity spectral beam combining of QCL

通过对机载 DIRCM 系统使用的中波红外激光器所涉及的主要关键技术分析,得出表 1 所示的激光器性能对比表,通过对比可以看出,量子级联激光器具有较好的发展前景。

表1 不同类型激光器性能对比表

Table 1 Performance comparison of different type lasers

机载 DIRCM 系统性能需求	固体/光纤激光 泵浦光参量振荡器	量子级联激光器
高功率激光输出	优	优
多波段激光输出	优	良
光束质量	良	良
工作环境温度	差	良
体积小、重量轻、功耗低	差	优

3 结束语

中红外激光器是 DIRCM 系统能够成功干扰红外制导导弹的关键,为了实现对各类导引头的有效干扰,DIRCM 系统对激光器的输出功率、光束质量、激光波段、工作温度范围和体积重量等均有严格要求。从国外典型 DIRCM 使用中波红外激光器情况可看出,早期装备使用的是中波光参量振荡激光器,最新的 CIRCUM 系统将采用 QCL 激光器。QCL 激光器能够有效地减少 DIRCM 系统的体积重量,提高系统的整体性能,代表了 DIRCM 系统的中波红外激光器的主要发展方向。

参考文献

- [1] KOZLOVSKII V I, KOROSTELIN Y V, LANDMAN A I, et al. Pulsed Fe²⁺: ZnS laser continuously tunable in the wavelength range of 3.49 ~ 4.65 μm [J]. *Quantum Electronics*, 2011, 41(1): 1-3.
- [2] ZHU G L, JU Y L, ZHANG C H, et al. High-power, high-quality ZGP OPO pumped by a Tm, Ho: GdVO₄ laser [J]. *Laser Physics*, 2010, 20(6): 1341-1343.
- [3] ELDER I. High average power thulium fiber laser pumped mid-IR source [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6738: 673804-1-673804-10.
- [4] MAULINI R, LYAKH A, TSEKOUN A G, et al. High power, high efficiency quantum cascade laser systems for directional infrared countermeasures and other defense and security applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7483: 74830D-1-74830D-9.
- [5] SIJAN A. Development of military lasers for optical countermeasures in the mid-IR [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7483: 748304-1-748304-14.
- [6] Selex ES Ltd. Type 160 infrared counter measures (IRCM) laser [EB/OL]. [2013-01-01]. www.selexgalileo.com/EL-EXGALILEO/UK/dsh202/121201/mjg.
- [7] 郑大壮. 美国陆军“通用定向红外对抗系统”(CIRCUM)项目取得重大进展 [J]. *轻兵器*, 2015, 20: 5.
- [8] HENRIKSSON M, SJÖQVIST L, STRÖMQVIST G, et al. Tandem PPKTP and ZGP OPO for mid-infrared generation [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7115: 711500-1-711500-10.
- [9] KOMINE H, FUKUMOTO J M, LONG W H, et al. Noncritically phase matched mid-infrared generation in AgGaSe₂ [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1995, 1(1): 44-49.
- [10] ZHU G L, JU Y L, WANG T H, et al. A mid-IR 14.1 W ZnGeP₂ optical parametric oscillator pumped by a Tm, Ho: GdVO₄ laser [J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, 26(3): 120-212.
- [11] LI X, XU X J, SHANG Y P, et al. Study on high power continuous-wave mid-infrared optical parametric oscillator [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9251: 92510A-1-92510A-4.
- [4] SMITH S M, BRADY J M. SUSAN—a new approach to low level image processing [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 23(1): 45-78.
- [5] MAIR E, HAGER G D, BURSCHKA D, et al. Adaptive and generic corner detection based on the accelerated segment test [C]//*Proceedings of the 11th European Conference on Computer Vision*, 2010: 183-196.
- [6] LEUTENEGGER S, CHLI M, SIEGWART R Y. BRISK: binary robust invariant scalable keypoints [C]//*Proceedings of International Conference on Computer Vision*, IEEE, 2011: 2548-2555.
- [7] ALAHI A, ORTIZ R, VANDERGHEYNST P. FREAK: fast retina keypoint [C]//*Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE, 2011: 510-517.
- [8] 张岩, 李建增, 李德良, 等. 基于特征的遥感图像匹配技术研究 [J]. *无线电工程*, 2016, 46(2): 61-64.
- [9] 尚明姝. 一种基于改进 SURF 的图像配准方法 [J]. *微电子学与计算机*, 2014, 31(2): 125-128.
- [10] 张岩, 李建增, 李德良, 等. 基于 POS 与图像匹配的无人机目标定位方法研究 [J]. *军械工程学院学报*, 2015, 27(1): 39-45.
- [11] 任超峰. 航空视频影像的正射影像制作关键技术研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- [12] 宫阿都, 何孝莹, 雷添杰, 等. 无控制点数据的无人机影像快速处理 [J]. *地球信息科学学报*, 2010, 12(2): 254-259.
- [13] WINDER S A J, BROWN M. Learning local image descriptors [C]//*Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE, 2007: 1-8.

(上接第 35 页)