

文章编号:1001-5078(2024)11-1651-08

· 综述与评论 ·

用于 DIRCM 系统的激光源研究进展

赵志刚, 赵镇, 王德飞, 刘虎, 陈庆良
(中国人民解放军 63895 部队, 河南 孟州 454750)

摘要: 红外精确制导技术的快速发展, 使得传统红外诱饵、红外全向干扰等防护措施的对抗效能迅速下降。定向红外对抗系统只在实施干扰时辐射激光, 光束窄、能量集中、无需加热, 且隐蔽性和时效性强, 是当前应对红外精确制导弹药的主流平台。激光源作为定向红外对抗系统的核心组件, 对干扰效能的发挥意义重大, 一直备受关注。介绍了可用于定向红外对抗系统的量子级联激光器等六类激光源的研究进展, 并结合激光源的集成性、稳定性和适配性对定向红外对抗系统的未来趋势进行了展望。

关键词: 激光源; 定向红外对抗; 量子级联

中图分类号: TN248.1; TN976 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.11.001

Research progress of lasers in directional infrared countermeasures system

ZHAO Zhi-gang, ZHAO Zhen, WANG De-fei, LIU Hu, CHEN Qing-liang
(No. 63895 Troops of PLA, Mengzhou 454750, China)

Abstract: The rapid development of infrared precision-guided technology has led to a rapid decline in the countermeasure effectiveness of traditional infrared decoys, infrared omnidirectional jamming and other protective measures. The directional infrared countermeasures system only radiates laser during interference, with narrow beam, concentrated energy, no need for heating, and strong concealment and timeliness, which is the mainstream platform for dealing with infrared precision guided strikes currently. As a core component of directional infrared countermeasures system, laser source plays a significant role in jamming efficiency and has been receiving much attention. The research progress of six types of laser sources, such as quantum cascade lasers, which can be used in directional infrared countermeasure systems, is introduced, and an outlook on the future trend of directional infrared countermeasure systems is given in the light of the integration, stability and adaptability of laser sources.

Keywords: laser; directional infrared countermeasures; quantum cascade

1 引言

20世纪60年代以来, 红外精确制导技术获得了飞速发展, 经历了非制冷型点源红外调幅、制冷型点源红外调频、脉冲编码、亚成像光机扫描和红外成像制导等过程, 并通过光谱滤光、目标识别、记忆跟踪、光谱鉴别、双色红外鉴别等技术, 持续提高抗干扰能力, 对各类红外目标构成了巨大威胁。统计资

料显示, 过去30多年的局部冲突和战争中, 大约有80%~90%的飞机是被红外制导导弹击落的。特别是凝视红外焦平面阵列成像技术的发展与广泛应用, 使得传统红外诱饵、红外全向干扰等措施的对抗效能全面落于下风。在此背景下, 20世纪末, 美、俄、英等国家相继开展定向红外对抗(Directional Infrared Countermeasures, DIRCM)技术的研究与系统

开发,以应对综合性能不断增强的先进红外精确制导弹药的威胁。

基于 DIRCM 技术的定向红外对抗系统相比于传统干扰手段,最大优势在于采用了综合性能优异的激光源,将干扰能量集中在特定立体角内定向发射,强度高、威力大,且只在实施干扰时发射激光,最大程度减小了干扰源暴露的风险^[1]。当前已广泛应用于机载、车载、舰载等多种武器平台。特别是在机载平台领域,DIRCM 系统的装配,极大地提高了运输机、预警机、直升机和民航客机目标大、速度慢、红外特征明显的飞行器的战场生存能力。知名型号如美国的 AN/AAQ-24、LAIRCM、CIRCM、俄罗斯的 MANTA、101KS-O、英国的 MiysisDIRCM 和以色列的 MUSIC 等,均具备优异的战术性能。

定向红外对抗系统通常由侦查告警、激光源、显控系统和辅助设备组成。其中,激光源是定向红外对抗系统干扰效能发挥的关键,通常要求波长 2 ~ 5 μm ,平均功率 10 W 甚至更高,具备良好的光束质量和环境适应性,体积小,重量轻且功耗低,因而一直是研发革新的热点^[2]。文章详细阐述了适配于定向红外对抗系统的量子级联激光器等六类激光源的研究进展,针对激光源的集成性、稳定性和发展前景等特性进行了对比分析,并对定向红外对抗系统的未来趋势进行了展望。

2 量子级联激光源

量子级联激光器(Quantum Cascade Lasers, QCL)为单极型半导体激光器,光子产生于导带内部子带间的电子跃迁。子带间隙比导带和价带的间隙小,且随着材料量子阱的厚度发生变化,因而 QCL 输出波长可延伸至 3 ~ 20 μm 中远红外波段。近年来,具有宽调谐范围、高输出功率和单模工作的 QCL 已经通过工程化验证,并实现了商业化。此外,QCL 还兼备传统半导体激光器抽运简单、体积小、重量轻、功耗和成本低等优点,在集成性方面优势显著,被普遍认为是 DIRCM 系统未来理想的激光源^[3]。

QCL 的历史相对较短,但发展速度却很快^[4-6]。1971 年 QCL 核心思想提出,1994 第一台低温 QCL 诞生,随后,室温脉冲 QCL(1996 年)、低温远红外 QCL(2001 年)、室温连续 QCL(2002 年)相继问世,同时也逐渐形成了相对完备的 QCL 基础理论。美国西北大学在 2006 年公开了室温环境下 45 % 占空

比 0.532 W@4 μm 的 QCL 和 80 K 环境下连续模式 1.6 W@4 μm 的 QCL,并相继公开了室温连续模式 2 W@4.7 μm (2008 年)、3.4 W@4.8 μm (2009 年)和 5.1 W@4.9 μm (2011 年),连续模式的电光转换效率最高达到 21 %。韩国 KyungHee 大学在 2008 年公开了室温 65 % 占空比 0.633 W@4.6 μm 和室温连续模式 0.469 W@4.6 μm 两种 QCL,电光转换效率分别为 8.6 % 和 3.1 %。美国 Pranalytica 公司在 2009 年公开了室温连续模式 3 W@4.6 μm 的 QCL,转换效率 12.7 %。瑞士苏黎世大学在 2016 年公开了室温连续模式 1 W@4.68 μm 的 QCL。我国中科院半导体所在 2017 年公开了室温连续模式 1.2 W@4.76 μm 的 QCL,电光转换效率 6 %。最新的科研成果为 2020 年美国西北大学公开室温脉冲 23 W@4.9 μm QCL,电光转换效率高达 31 %^[7]。可以预测,随着高质量芯片制备和高光束质量多路合束等技术的发展,QCL 的输出功率将会更高。

除科研公开的资料外,QCL 产品化的进程也很快。美国 DaylightDefense 公司的 SolarisQCL 单只最大功率 2 W,通过合束技术可实现 15 W 平均功率输出,已经批量应用于美国陆军通用定向红外对抗系统中。Pranalytica 公司推出的室温工作 2.5 W@/3.8 μm /4 μm 、3.5 W@/4.6 μm ,光束质量接近衍射极限,尺寸小巧,重约 1.9 kg;此外,该公司的 MultiLux 型号,可同时输出 3 W@2 μm /2 W@4 μm /3 W@4.6 μm ,光束质量 M^2 均优于 1.2,整体尺寸 25 cm × 25 cm × 17 cm,重约 9 kg。法国 MirSense 公司推出的单只室温工作输出最大平均功率 2 W@/4 μm /4.6 μm 型号产品, M^2 优于 1.5,电光转换效率高于 7 %,尺寸仅为 45 mm × 32 mm × 19 mm。瑞士的 AlpesLasers 公司是全球第一家商业 QCL 公司,推出的室温工作输出最大平均功率 1.2 W@/3.95 μm /4.9 μm 、1.5 W@/4.55 μm /4.65 μm 型号产品,尺寸为 45 mm × 33 mm × 19 mm。美国 Thorlabs 公司作为 QCL 产品系列化的典型代表,推出了如表 1 所示的多种型号,封装形式多样,结构紧凑,后续系统集成性能优异^[8]。同时由表 1 中所列型号的发布时间、单只 QCL 重量、输出功率和价格等信息也能清晰呈现 QCL 商品化的进程。此外,美国的 BlockEngineering、CascadeTechnologies,德国的 NeoplasControlInC 等公司也有 QCL 模块或系统在售。

综合上述信息可知,美国和欧洲几个少数国家在 QCL 领域科研推进比较深入且商业化技术日趋

成熟,结合 QCL 小型轻量化的特点,DIRCM 系统将会很快实现模块化、通用化。

表 1 THORLABS 商用化 QCL 信息表

Tab. 1 THORLABS commercializes QCL information tables

型号	波长/ μm	最大功率/W	发布时间	单价/元	重量/kg
QD4500CM1	4.00 ~ 5.00	0.04	2016.01.19	56043	0.08
D-Mount/QF4050D2	3.90 ~ 4.20	0.8	2018.04.19	63048	0.21
D-Mount/QF4050D3	3.90 ~ 4.20	1.2	2018.04.19	77059	0.27
D-Mount/QF4600D4	4.45 ~ 4.75	2.5	2019.11.11	67252	0.21
QF4650HHLH	4.65	1.5	2021.01.20	79394	0.47
QF3850HHLH	3.85	0.32	2021.01.20	79394	2.3
QF4040HHLH	4.04	0.32	2021.02.09	79394	2.30
C-Mount/QF4600C2	4.60	0.6	2021.08.12	43293	0.18
QF4600T3	4.60	1.0	2022.06.30	52307	0.06
D-Mount/QF4600D3	4.45 ~ 4.75	3	2022.08.12	79394	0.21

3 基于非线性频率转换技术的激光源

基于非线性频率转换技术的激光源是利用非线性效应将近红外激光转换为中/长波红外激光输出的技术,具有结构简单、转换效率高、输出功率高、调谐性好等特点,而且非线性晶体不参与能量交换,没有量子亏损,发热少,性能稳定,是当前中红外激光生成技术的主流^[9]。当前已知的 DIRCM 系统如 AN/AAQ-24、LAIRCM、AN/ALQ-212、MUSIC 等,都采用了该体制激光源。

非线性频率转换技术的核心是非线性晶体,直接决定了激光最终的输出特性。经过 60 余年的发

展,非线性晶体在制备工艺和新材料研究方面取得了重大进展,涌现了诸如 KTA(PPKTA)、KTP(PPKTP)、AgGaS₂、ZGP、LN(MgO:PPLN)、BaGa₄Se₇等综合性能优异的晶体,且大部分都已经实现了产业化、商品化。同时伴随着泵浦源、温控、镀膜等相关技术和工艺的提升,此类中红外激光器获得了快速发展并被广泛应用。而且此类激光器整体技术相对成熟,有多种晶体体制的激光器可供 DIRCM 系统选择。近年来,此类激光器在大功率、高光束质量和高光光转换效率方面的代表性成果如表 2 所示。

表 2 基于非线性频率转换技术的激光源

Tab. 2 Laser source based on nonlinear frequency conversion technology

时间	工作介质	波长/ μm	功率/W	光束质量(M^2)	效率/%
沈永行(2022) ^[10]	MgO:PPLN	3.8	5.4	1.52/1.65	13.5
何洋(2022) ^[11]	MgO:PPLN	3.754	9.15	3.2/2.4	11.57
He(2022) ^[12]	MgO:PPLN	3.754	10.82	2.98/2.08	13.68
Zhao(2018) ^[13]	ZGP	3.84/4.59	110	8/8.7(100 W)	53.9
钱传鹏(2019) ^[14]	ZGP	3.92/4.57	102	2.7/2.8	60
Liu(2021) ^[15]	ZGP	3.89/4.55	161	3.42/3.82	55.3
Wang(2022) ^[16]	ZGP	4.07/4.3	13.27	1.8/2.0	37.9
魏星斌(2023) ^[17]	ZGP	3.82	6.5	<3	28.5
魏星斌(2023) ^[18]	ZGP	3.53/4.15	17.8	2.88/2.55(3.53 μm) 3.07/2.74(4.15 μm)	62.2
Liu(2020) ^[19]	BGSe	3.95/4.44	4.35	2.2/2.3	18.1

基于非线性频率转换技术的激光源已经在众多 DIRCM 系统中进行了试验检验,综合适配度很高。与其他类型的激光源相比,在输出功率、紧凑性和稳定性方面,优势都很突出,只有在小型轻量化、模块化方面不及 QCL,未来在机载平台上大规模集成可能会失去主流地位。但随着光纤技术的融合使用、大尺寸非线性晶体制备工艺、高抗损伤镀膜等技术的快速发展,基于非线性频率转换技术的激光源在未来依然是 DIRCM 系统优选方案。

4 基于稀土离子和过渡金属掺杂的激光源

基于稀土离子和过渡金属离子掺杂的激光器通

过在晶体中掺杂 Tm^{3+} 、 Ho^{3+} 、 Er^{3+} 、 Dy^{3+} 等稀土离子或 Cr^{2+} 、 Fe^{2+} 等过渡金属离子改变晶体能级结构,实现高效、高稳定性中红外激光输出^[20]。常用的稀土掺杂离子的基质、泵浦带和发射谱如表 3 所示。掺杂稀土离子的固体激光器通常采用近红外半导体或光纤激光器作为泵浦源,输出功率高,光束质量好,并且谱线较窄。近年来代表性成果如表 4 所示。典型的过渡金属离子掺杂固体激光器有掺铬硒化锌($\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$)、掺铁硒化锌($\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$)和掺铬硫化锌($\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$)三种,结构紧凑、转换效率高,输出波长覆盖 2~5 μm 。近年来报道的代表性研究成果如表 5 所示。

表 3 稀土离子特性

Tab. 3 Rare earth ion characteristics

掺杂离子	基质	泵浦带	发射谱
Tm^{3+}	石榴石、倍半氧化物、陶瓷、光纤	790 nm、1.6 μm 、1.9 μm	~1.9 μm 、~2.3 μm
Ho^{3+}	氧化物晶体、氟化物晶体、光纤	1.9 μm	~2.1 μm 、~2.9 μm
Er^{3+}	石榴石、氟化物、倍半氧化物、光纤	980 nm	~1.6 μm 、~2.7 μm
Dy^{3+}	氟化物、光纤	1.1 μm 、1.3 μm 、1.7 μm	~3.4 μm

表 4 基于稀土离子掺杂的激光源

Tab. 4 Laser source based on rare earth ion doped

时间	工作介质	波长/ μm	功率/W	光束质量(M^2)	效率/%	体制
Shen(2012) ^[21]	$\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$	2.097/2.122	103	<2	63.5	固体
Duan(2018) ^[22]	$\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$	2.091	146.4	<2.2	61.2	固体
Zhao(2018) ^[13]	$\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$	2.09	231	1.04/1.05	60.7	固体
Tang(2020) ^[23]	$\text{Ho}^{3+}:\text{YAP}$	2.117	107.3	3.2/2.6(80 W)	49.9	固体
Wang(2021) ^[24]	$\text{Ho}^{3+}:\text{YLF}$	2.064	125	475/1.59	51	固体
任席奎(2015) ^[25]	$\text{Tm}^{3+}:\text{YAP}$	1.988	39.4	/	32.8	固体
Messner(2016) ^[26]	$\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$	2.94	53	<15	/	固体
方聪(2023) ^[27]	$\text{Er}^{3+}:\text{YAP}$	2.712	10.12	5.6	5.5	固体
Patrick(2022) ^[28]	$\text{Ho}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ 光纤	2.1	262	1.2/1.2	46	光纤
V. Fortin(2019) ^[29]	$\text{Dy}^{3+}:\text{ZBLAN}$	3.24	10.1	/	53.2	光纤
Anderson(2021) ^[30]	Tm^{3+} 光纤	1.95	1101	1.09/1.07	50.7	光纤
Fortin(2015) ^[31]	$\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$	2.938	30.5	1.13/1.12	16	光纤
Yao(2020) ^[32]	$\text{Er}^{3+}:\text{YAP}$	2.92	6.9	2.2/1.8(3.7 W)	27.9	光纤
郭春雨(2021) ^[33]	$\text{Er}^{3+}:\text{ZrF}_4$	2.83	20.3	1.3	14.5	光纤
张钧翔(2023) ^[34]	$\text{Er}^{3+}:\text{ZrF}_4$	2.8	33.8	/	26.4	光纤
肖旭升(2023) ^[35]	$\text{Er}^{3+}:\text{ZrF}_4$	3.5	10.1	/	37.4	光纤

表 5 基于过渡金属离子掺杂的激光源

Tab.5 Laser source based on transition metal ion doped

时间	工作介质	环境	波长/ μm	功率/W	光束质量(M^2)	效率/%
王云鹏(2016) ^[36]	$\text{Cr}^{2+}; \text{ZnSe}$	常温	2.3	3	1.7/1.73	17.2
Moskalev(2016) ^[37]	$\text{Cr}^{2+}; \text{ZnS}/\text{Cr}^{2+}; \text{ZnSe}$	常温	2.5/2.94	140/32	1.77	62/29
Velikanov(2017) ^[38]	$\text{Fe}^{2+}; \text{ZnSe}$	室温	4.3	20W	/	25
Martyskhin(2017) ^[39]	$\text{Fe}^{2+}; \text{ZnSe}$	77K	4.15	9.2	/	41.2
Pan(2020) ^[40]	$\text{Fe}^{2+}; \text{ZnSe}$	室温	4.35~4.6	21.7	/	32.6

掺杂稀土离子的固体激光器波长主要集中在 2~3 μm 波段,功率已达千瓦级,而且和光纤激光器进行了融合应用,在稳定性、紧凑型方面有了很大提升,适用性更强。过渡金属离子掺杂的固体激光器波长更长,输出功率也在逐步提升,而且固有的高稳定性和紧凑型特性使得其在应用方面优势比较明显。虽然在已报道的 DIRCM 系统中,还没有基于稀土离子和过渡金属离子掺杂的激光器的应用实例,但从目前的研究成果来看,很多已经具备 DIRCM 系统的加装条件,预测未来可能会被 DIRCM 系统引入。

5 其他激光源

光纤激光器是用掺杂稀土元素光纤作为增益介质的激光器,输出功率高、光束质量好、性能稳定、结构紧凑、散热性好,发展迅速且应用广泛。光纤激光器的激光输出特性主要和光纤基质与稀土离子相关。当前,氟化物玻璃是中红外激光最适宜的基质材料,而常见的稀土离子主要有 Tm^{3+} 、 Ho^{3+} 、 Er^{3+} 、 Dy^{3+} 等。近年来的代表性研究成果如表 4 所示。虽然中红外光纤激光器发展潜力巨大,但当前受限因素较多。掺杂硫化物和氟化物光纤熔点低、易损伤、非线性效应强,制备工艺复杂,国际上仅有法国和日本能提供商业化产品,价格昂贵。耦合器、隔离器、环形器等相关器件技术不成熟,且高质量的氟化物光纤处理工艺不完善,全光纤化面临重重困难。因此,全光纤化中红外激光器在 DIRCM 系统中尚不具备直接应用条件,目前只能与其他激光器组合使用,比如作为 OPO、离子掺杂固体激光器等系统的抽运源,间接在 DIRCM 系统中应用。

化学激光器是利用化学反应释放的能量使得物质原子产生相应激发,实现粒子数反转,最终获得激光输出。常见的有氟化氢(HF)、氟化氘(DF)、溴化氢(HBr)、氯化氢(HCl)等。化学激光器在 2~

5 μm 可以实现大功率输出,优势明显。2019年,黄超等制备的闭环非链式重频 HF 激光器实现了平均功率 200 W 的中红外激光输出。2020年,我国中科院大连化学物理研究所研制的 HBr 激光器首次实现了 1000 W 级连续光输出,远高于其他同波段固态激光器,刷新了国际记录。基于此,由西班牙 Indra 公司和俄罗斯国防出口公司联合开发的 MANTA 系统,最初采用的就是 DF 激光器。但后来在已报道的 DIRCM 系统中,几乎没有采用化学激光源。

气体激光器是以气体或蒸汽为工作介质,利用特定方法激励气体实现增益介质粒子数反转产生激光辐射。优势主要是输出功率高、成本低廉、光束质量高、稳定好。经过多年的发展虽然取得了一定的成果,但受限于系统庞大笨重的体积和较低的转换效率,应用相对较少。后来空芯光纤的融入为气体激光器带来了新的方向。随着低传输损耗抗共振空芯光纤技术的快速发展,光纤气体激光器的研究报道逐渐增多。2011年, Jones 等首次实现了光纤气体激光器中红外激光输出。2016年, Hassan 等首次实现了环形腔光纤气体激光器中红外激光输出。2017年, Xu 等将光纤气体激光器输出的中红外激光功率提升至瓦级。2022年,黄威等实现了 4.5 W @ 3.1 μm 的中红外激光输出,总的光-光转换效率约为 14%,是当前光纤气体激光器的最大输出功率^[41]。该项成果表明,光纤气体激光器具备高功率中红外激光输出的潜力。光纤气体激光器作为一种新兴的气体激光器,结合了气体和光纤激光器的优势,发展与应用前景光明,但尚处于初级阶段,是否适用于 DIRCM 系统,还需时间检验。

自由电子激光器早在 2011 年就有报道输出功率突破万瓦量级,但体积庞大、效率低,且造价昂贵,难以满足 DIRCM 系统的应用需求,在此不作讨论。

6 分析与展望

当前,各类中红外激光器的研究都取得了不错的进展,成果丰硕,为未来 DIRCM 系统的集成应用提供了更多选择。表 6 所示为当前各类激光光源与 DIRCM 系统的适配性分析。虽然目前已

报道的 DIRCM 系统大部分使用的激光光源为 QCL 和 OPO,但每种激光光源都具有独特的优势,DIRCM 系统在设计时,必须依据搭载的武器平台,针对性的优选适配的激光光源,才能获得最优的性价比。

表 6 适配于 DIRCM 系统的激光光源综合性能对比

Tab. 6 Comprehensive performance comparison of laser sources for DIRCM systems

激光光源类别	3 ~ 5 μm 波段	Max 输出功率	系统结构	集成性	稳定性	当前适配度
QCL	全覆盖	< 20 W	简单	优	优	优
非线性频率转换激光光源	全覆盖	> 100 W	复杂	一般	优	优
掺杂离子直接发射激光光源	全覆盖	> 1000 W	简单	良	优	良
化学激光器	全覆盖	> 1000 W	复杂	一般	良	一般
光纤气体激光器	全覆盖	< 10 W	复杂	优	良	一般
光纤激光器	全覆盖	> 30 W	复杂	优	良	良

此外,激光光源在武器平台上的加装应用和新型泵浦源等领域也不断有新成果涌现,可供 DIRCM 系统设计与应用时借鉴。

美国在“黑鹰”直升机上的通用红外对抗(Common Infrared Countermeasures, CIRCM)系统中采用 QCL,系统重量减轻 50% 以上,功耗不到原来的 30%。基于这些优势及巨大的发展潜力,美日等国都在持续斥巨资对 QCL 进行研发革新。QCL 小型轻量化可以实现型号通用性,完美适配于机载平台,除了搭载于各类大型机外,还满足小型无人飞行器的应用需求,为未来作战提供了更多可能。

美国雷神公司利用光纤激光器低传输损耗特性,基于 AIM-9X 导引头开发出新一代的 DIRCM 系统。该系统将多波段固体激光器从 AIM-9X 稳定平台剥离,发射的激光通过光纤送至激光传输镜头(镜头的光轴与 AIM-9X 的光轴平行设置),大幅减轻了稳瞄装置的负载,提高了系统的旋转速率和跟踪精度,使其具备了应对多次和短距离导弹攻击的能力^[42]。

随着 ZGP 晶体制备工艺的进步,吸收边界不断向短波方向拓展,~1.9 μm 处的吸收系数几乎可与 2 μm 基频光的吸收系数相比拟,使得掺 Tm 激光可以直接抽运 ZGP OPO 获得中红外激光输出。这种方式避免了 Tm 抽运 Ho 的中间环节和能量损失,结构更紧凑,转换效率更高。2022 年,美国 Livermore 实验室报道了平均功率 3.6 kW 的 Tm:YLF 放大器,表明 Tm:YLF 可获得高平均功率输出,预示着中

红外激光功率有望获得跨量级提升^[17]。

随着科技水平的快速发展及学科交叉应用研究的持续深入,未来中红外激光光源必将在大功率、高光束质量、高稳定性、小型轻量化等方面不断取得突破,为 DIRCM 系统在各类武器平台上的批量集成提供更多选择。同时,伴随着双色告警技术、高精度跟踪技术和模块化替代等技术和体制的快速推进,未来 DIRCM 系统必将展现出更强的抗干扰能力,全面提升红外精确制导弹药威胁下的各类目标的战场生存能力。

参考文献:

- [1] He Binggao, Sun Xiangyang, Shi Lijuan. Design of laser beam expanding system in tracking platform of directional interference[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(7): 903 - 908. (in Chinese)
何秉高,孙向阳,史丽娟. 定向干扰跟踪平台的激光扩束系统设计[J]. 激光与红外, 2018, 48(7): 903 - 908.
- [2] Yang Aifen, Zhang Jia, Li Gang, et al. Technology of MWIR laser in directed infrared countermeasure systems[J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(1): 119 - 125. (in Chinese)
杨爱粉,张佳,李刚,等. 用于定向红外对抗系统的中波红外激光器技术[J]. 应用光学, 2015, 36(1): 119 - 125.
- [3] Liu Fengqi, Zhang Jinchuan, Liu Junqi, et al. Progress in quantum cascade lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0701007. (in Chinese)
刘奇峰,张锦川,刘俊岐,等. 量子级联激光器研究进

- 展[J]. 中国激光,2020,47(7):0701007.
- [4] Cheng Naijun, Li Weifan, Qi Feng. Progress of mid-infrared laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(17):1700006-1-1700006-18. (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):1700006-1-1700006-18.
- [5] Huang Yan, Zhang Yulu, Gao Zhiqiang, et al. Overview of high-power quantum cascade lasers for directional infrared countermeasures[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2019, 40(5):1-6. (in Chinese)
黄彦,张宇露,高志强,等. 用于定向红外对抗的高功率量子级联激光器发展综述[J]. 遥测遥控, 2019, 40(5):1-6.
- [6] Liu Ying, Jiang Tao, Yang Qi, et al. Research progress of tunable mid-infrared quantum cascade lasers[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2024, 22(1):87-95. (in Chinese)
刘莹,蒋涛,杨奇,等. 中红外可调谐量子级联激光器研究进展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2024, 22(1):87-95.
- [7] F Wang, S Slivken, D H Wu, et al. Room temperature quantum cascade laser with ~31% wall-plug efficiency[J]. AIP Advances, 2020, 10(7):075012-1-075012-4.
- [8] THORLABS[EB/OL]. <https://www.thorlabs.com/search/thorsearch.cfm?search=QCL>.
- [9] Zhao Zhigang, Wang Defei, Li Peng, et al. Latest research progress of laser based on ZGP crystal in directional infrared jamming system[J]. Laser & Infrared, 2022, 52(10):1436-1441. (in Chinese)
赵志刚,王德飞,李鹏,等. 定向红外干扰系统中磷锗锌激光器的最新进展[J]. 激光与红外, 2022, 52(10):1436-1441.
- [10] Shen Yonghang, Wu Bo, Hu Chengzhi, et al. Experimental investigation on the high average power ns mid-infrared laser output at 3.8 μm through difference frequency generation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1):0101017. (in Chinese)
沈永行,吴波,胡澄之,等. 激光差频技术实现高平均功率 3.8 μm 纳秒中波红外激光输出实验研究[J]. 中国激光, 2022, 49(1):0101017.
- [11] He Yang, Chen Fei, Wang Haohua, et al. Fiber-laser-pumped high-power mid-infrared optical parametric oscillator based on MgO:PPLN crystal[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34(3):031003-1-031003-5. (in Chinese)
何洋,陈飞,万浩华,等. 光纤激光器泵浦 MgO:PPLN 高功率中红外光参量振荡器[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(3):031003-1-031003-5.
- [12] He Yang, Ji Yanhui, Wan Haohua, et al. High-power mid-infrared pulse MgO:PPLN optical parametric oscillator pumped by linearly polarized Yb-Doped all-fiber laser[J]. Optics & Technology, 2022, 146:107545.
- [13] Zhao Benrui, Yao Baoquan, Qian Chuanpeng, et al. 231 W dual-end-pumped Ho:YAG MOPA system and its application to a mid-infrared ZGP OPO[J]. Optics Letters, 2018, 43(24):5989-5992.
- [14] Qian C P, Yao B Q, Zhao B R, et al. High repetition rate 102 W middle infrared ZnGeP₂ master oscillator power amplifier system with thermal lens compensation[J]. Optics Letters, 2019, 44(3):715.
- [15] Liu Gaoyou, Mi Shuyi, Yang Ke, et al. 161 W middle infrared ZnGeP₂ MOPA system pumped by 300W-class Ho:YAG MOPA system[J]. Optics Letters, 2021, 46(1):82-85.
- [16] Wang Feifei, Li Jiatong, Sun Xiaohui, et al. High-power and high-efficiency 4.3 μm ZGP-OPO[J]. Chinese Optics Letters, 2022, 20(1):011403-011403-5.
- [17] Wei Xingbin, Yin Wenlong, Zhang Song, et al. High-efficiency compact Tm:YLF pumped mid-infrared ZGP optical parametric oscillator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(24):2416005-1-2416005-2. (in Chinese)
魏星斌,尹文龙,张淞,等. 高效率紧凑型 Tm:YLF 抽运的中红外 ZGP 光参量振荡器[J]. 中国激光, 2023, 50(24):2416005-1-2416005-2.
- [18] Wei Xingbin, Zhang S, Liu Z, et al. High-power mid-infrared ZGP optical parametric oscillator directly pumped by pulsed Tm:YLF laser at 1908 nm[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 161:109135.
- [19] Liu Gaoyou, Chen Yi, Li Zhuang, et al. High-beam-quality 2.1 μm pumped mid-infrared type-II phase-matching BaGa₄Se₇ optical parametric oscillator with a ZnGeP₂ amplifier[J]. Optics Letters, 2020, 45(13):3805-3808.
- [20] Ye Shuai. Study on 2-4 μm mid-infrared all-solid state laser[D]. Ji'nan: University of Shan Dong, 2023. (in Chinese)
叶帅. 2-4 μm 中红外全固态激光器研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
- [21] Shen Yingjie, Yao Baoquan, Duan Xiaoming, et al. 103 W in-band dual-end-pumped Ho:YAG laser[J]. Optics Letters, 2012, 37(17):3558-3560.
- [22] Duan Xiaoming, Shen Yingjie, Yao Baoquan, et al. 146.4 W end-pumped Ho:YAG slab laser with two crystals[J]. Quantum Electronics, 2018, 48(8):691-694.
- [23] Tang Jinwen, Li Enhao, Wang Fei, et al. High power Ho:YAP laser with 107 W of output power at 2117 nm[J].

- IEEE Photonics Journal,2020,12(2):1501107.
- [24] Wang Qingcheng, Long Qunlong, Gao Yuan, et al. High-efficiency Ho:YLF slab laser with 125 W continuous-wave output power [J]. Applied Optics, 2021, 60 (26): 8046 – 8049.
- [25] Ren Xikui, Li Chunbo, Wang Dongdong. High power Tm-doped solid laser [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2015, 32(4): 411 – 416. (in Chinese)
任席奎, 李春波, 王冬冬, 等. 高功率掺铥固体激光器 [J]. 深圳大学学报理工版, 2015, 32(4): 411 – 416.
- [26] Messner M, Heinrich A, Hagen C et al. High brightness diode pumped Er:YAG laser system at 2.94 μm with nearly 1 kW peak power [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9726 – 972602.
- [27] Fang Cong, Li Bao, Chen Guo, et al. 10 W diode-pumped Er:YAP mid-infrared laser [J]. Laser & Infrared, 2023, 53(6): 875 – 880. (in Chinese)
方聪, 李宝, 陈国, 等. 10 W 二极管泵浦 Er:YAP 中红外激光器 [J]. 激光与红外, 2023, 53(6): 875 – 880.
- [28] Patrick Forster, Clement Romano, Julian Schneider, et al. High-power continuous-wave Tm^{3+} : Ho^{3+} -codoped fiber laser operation from 2.1 μm to 2.2 μm [J]. Optics Letters, 2022, 47(10): 2542 – 2545.
- [29] Vincent Fortin, Frederic Jobin, Maxence Larose, et al. 10 W-level monolithic dysprosium-doped fiber laser at 3.24 μm [J]. Optics Letters, 2019, 44(3): 491 – 494.
- [30] Brian M. Anderson, Joel Soloman, Angel Flores. 1.1 kW, beam-combinable thulium doped all-fiber amplifier [J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11665: 116650B – 1 – 116650B – 6.
- [31] Fortin Vincent, Bernier Martin, Bah S T. Souleymane, et al. 30 W fluoride glass all-fiber laser at 2.94 μm [J]. Optics Letters, 2015, 40(12): 2882 – 2885.
- [32] Yao Weichao, Uehara Hiyori, Kawase Hiroki, et al. Highly efficient Er:YAP laser with 6.9 W of output power at 2920 nm [J]. 2020, Optics Express, 28(13): 19000 – 19007.
- [33] Guo Chunyu, Dong Fanlong, Shen Pengsheng, et al. Study on 20 W 2.8 μm mid-infrared all fiber laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(14): 1416001 – 1 – 1416001 – 2. (in Chinese)
郭春雨, 董繁龙, 沈鹏生, 等. 20 W 中红外 2.8 μm 全光纤激光器研究 [J]. 2021, 48(14): 1416001 – 1 – 1416001 – 2.
- [34] Zhang Junxiang, Fu Shijie, Sheng Quan, et al. Efficient 33.8 W mid-infrared laser operating at 2.8 μm [J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(7): 0715001 – 1 – 0715001 – 4. (in Chinese)
张钧翔, 付士杰, 盛泉, 等. 33.8 W 高效率中红外 2.8 μm 光纤激光器 [J]. 中国激光, 2023, 50(7): 0715001 – 1 – 0715001 – 4.
- [35] Xiao Xusheng, Chen Yewei, He Wentao, et al. Study on 10 watt-class 3.5 μm mid-infrared all-fiber laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 51(5): 0516001 – 1 – 0516001 – 2. (in Chinese)
肖旭升, 谌业威, 何文涛, 等. 10 瓦级 3.5 μm 中红外全光纤激光器研究 [J]. 中国激光, 2023, 51(5): 0516001 – 1 – 0516001 – 2.
- [36] Wang Yunpeng, Wang Fei, Zhao Dongxu. All solid state Mid-IR laser of Cr^{2+} : ZnSe [J]. Chinese Optics, 2016, 9(5): 563 – 568. (in Chinese)
王云鹏, 王飞, 赵东旭. Cr^{2+} : ZnSe 全固态中红外激光器 [J]. 中国光学, 2016, 9(5): 563 – 568.
- [37] Igor Moskalev, Sergey Mirov, Mirov Mike, et al. 140 W Cr: ZnSe laser system [J]. Optics Express, 2016, 24(18): 21090 – 21104.
- [38] Velikanov S D, Gamrshchuk E M, Zaretsky N A, et al. Repetitively pulsed Fe: ZnSe laser with an average output power of 20 W at room temperature of the polycrystalline active element [J]. Quantum Electronics, 2017, 47(4): 303 – 307.
- [39] Martyshkin D V, Fedorov V V, Mirov M, et al. High power (9.2 W) CW 4.15 μm Fe: ZnSe laser [J]. Cleo: Science & Innovations, 2017.
- [40] Pan Qikun, Xie Jijiang, Chen Fei, et al. Transversal parametric oscillation suppression in high gain pulsed Fe^{2+} : ZnSe laser at temperature [J]. Optics and Laser Technology, 2020, 127: 106151.
- [41] Huang Wei, Zhou Zhiyue, Cui Yulong, et al. 4.5 W 3.1 μm mid-infrared fiber gas laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1): 0101024 – 1 – 0101024 – 4. (in Chinese)
黄威, 周智越, 崔宇龙等. 4.5 W 中红外 3.1 μm 光纤气体激光器 [J]. 中国激光, 2022, 49(1): 0101024 – 1 – 0101024 – 4.
- [42] Wu Wei, Li Jianzheng, Jiang Chengzhou, et al. Baytheon DIRCM system research based on AIM-9X [J]. Laser & Infrared, 2024, 54(3): 336 – 339. (in Chinese)
武伟, 李建征, 姜成舟, 等. 雷神基于 AIM-9X 的 DIRCM 系统研究 [J]. 激光与红外, 2024, 54(3): 336 – 339.