

战术激光武器反无人机发展现状和关键技术分析

朱孟真 陈霞 刘旭 谭朝勇 黎伟

Situation and key technology of tactical laser anti-UAV

Zhu Mengzhen, Chen Xia, Liu Xu, Tan Chaoyong, Li Wei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20200230>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于卷积神经网络的反无人机系统图像识别方法

Image recognition method of anti UAV system based on convolutional neural network

红外与激光工程. 2020, 49(7): 20200154-1-20200154-8 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200154>

无人机红外辐射建模与图像仿真

UAV infrared radiation modeling and image simulation

红外与激光工程. 2017, 46(6): 628002-0628003(7) <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0628002>

灾情侦测无人机动态航迹规划算法设计

Design of dynamic track planning algorithm for disaster detection UAV

红外与激光工程. 2019, 48(10): 1026003-1026003(6) <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.1026003>

一种用于无人机的目标颜色核相关跟踪算法研究

A target color kernel correlation tracking algorithm for UAVs

红外与激光工程. 2018, 47(3): 326001-0326001(7) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0326001>

美国地基反卫星激光武器发展分析

Development analysis of American anti-satellite ground-based laser weapon

红外与激光工程. 2020, 49(S1): 20190352-20190352 <https://doi.org/10.3788/IRLA20190352>

基于SAE与底层视觉特征融合的无人机目标识别算法

UAV target recognition algorithm based on fusion of SAE and bottom visual feature

红外与激光工程. 2018, 47(S1): 197-205 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.S126004>

战术激光武器反无人机发展现状和关键技术分析

朱孟真, 陈霞, 刘旭, 谭朝勇, 黎伟

(陆军工程大学军械士官学校, 湖北武汉 430075)

摘要: 无人机技术的发展和肇事事件的日益增多, 对国防和社会安全构成了巨大的威胁, 其防控已成为世界性难题。由于常规武器的局限性, 难以对其实施有效防御。战术激光武器技术日趋成熟, 在反无人机方面具有巨大的优势。文中梳理了战术激光武器反无人机的进展和现状, 并对包括高能高功率激光器和光束合成技术的高能激光源、跟瞄发射、高效毁伤三个方面的关键技术进行了分析总结, 指出了优缺点, 明确了发展方向, 为激光防御低慢小目标的发展提供借鉴。

关键词: 战术激光; 无人机; 激光源; 高效毁伤

中图分类号: TN248 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20200230

Situation and key technology of tactical laser anti-UAV

Zhu Mengzhen, Chen Xia, Liu Xu, Tan Chaoyong, Li Wei

(Ordnance Non-Commissioned Officer Academy, Army Engineering University, Wuhan 430075, China)

Abstract: The accident occurrence of UAV is increasing relatively with the development of it, which become a fatal threat to national defence and social security. Handling such problem has become a difficult mission for all countries. Conventional arms, due to the restriction, are hard to defend UAV. With the development of technology, tactical laser weapon is revealing great advantage in defending such aircraft. In this article, the development and actuality of tactical laser anti-UAV are sorted out. The key technology in three aspects, which are high energy laser source includes high energy laser and beam combining, quision tracking pointing, high efficient destroying, are analyzed and summarized. This article points out the developing direction of tactical laser anti-UAV, which could be considered as a reference as well.

Key words: tactical laser; UAV; laser source; high efficiency destroying

收稿日期: 2020-10-14; 修订日期: 2021-01-13

基金项目: 国防预研基金 (30102210101); 国防科研项目 (KYWHJWJK1702)

作者简介: 朱孟真, 男, 讲师, 硕士, 主要从事固态激光器及激光毁伤对抗技术方面的研究。

0 引言

近年来,随着技术的不断发展,无人机不仅在军事领域发挥重要作用,在民用领域也得到了广泛应用。然而,其肇事事件的日益增多,对国防和社会安全构成了巨大的威胁。在技术方面,小型化、机群化、隐身化与智能化水平不断提高,且成本低廉、操作简单。在应用方面,无人作战系统已成为空袭作战不可替代的新发展方向,对军事行动产生重大影响,同时,以小型无人机为代表的非传统空中安全威胁具有很强的突发性和隐蔽性,威胁范围广、表现形式多、造成影响大。因此,对低空无人机进行反制在军、民领域均具有强烈的需求,已成为世界性难题。

常规武器难以对无人机实施有效防御。近年来,战术激光武器得到了军事强国的大力发展,技术日趋成熟,在反无人机方面具有巨大的优势。文中梳理了战术激光武器反无人机的发展现状,并对其关键技术进行了分析总结,指出了发展方向。

1 战术激光武器反无人机的发展现状

无人机的防控包括了预警探测、电子干扰、拦截摧毁三个阶段,其中,拦截摧毁是最终保底手段,包括传统弹炮火力拦截、激光武器、高功率微波、网捕等。近年来,战术激光武器得到迅猛发展^[1],正逐步进入实战阶段,其最实际有效的应用便是防御拦截无人机等目标,具有打击速度快、作战效费比高、可持续作战、效果可控、附带毁伤小等优势。近期国外代表性的进展(见表 1 所示)有:

诺斯罗普·格鲁曼公司(Northrop Grumman)2011年研制的“海上激光演示项目”^[1](MLD)采用功率 105 kW 激光样机,在圣尼古拉斯岛附近海域成功引燃 1.6 km 外的移动无人小船。2020 年,该公司研制的“激光武器系统演示”(LWSD)采用 150 kW 激光源(SSL-TM),安装在“波特兰”号运输舰上进行海上测试时击毁了飞行中的无人机^[2]。

波音公司(Boeing)在 2012 年研制了“高能激光机动演示系统”(HELMD),激光功率 10 kW,在 2014 年的测试中成功击落 150 多个空中目标,在 5 km 距离击落大型无人机^[3]。

洛克希德·马丁公司(Lockheed Martin)在 2012 年采用 10 kW 光纤激光器作为激光源研制出“可移动的陆基区域防御反弹药系统”(ADAM),在测试中摧毁了翼展 3.5 m 的无人机和 2 枚从 1.6 km 外飞来的火箭弹^[4]。2015 年,采用 30 kW 光纤激光器研发的“先进测试高能武器系统”(ATHENA),迅速烧毁了 1 mi (1 mi=1.609 3 km)之外的汽车发动机歧管。2017 年^[4],研制的 60 kW 功率的激光武器系统交付美国陆军。2019 年,安装该系统的“高能激光移动测试车”(HELMTT)试验了反火箭弹、炮弹以及无人机的能力,几乎同时击落了 5 架翼展约为 3.3 m 的无人机。2018 年,采用该激光源技术为美国海军研制“高能激光与一体化光学致盲和监视”(HELIOS)激光炮^[5-6]。2019 年,为美国空军研制的“自卫式高能激光演示样机”(SHIELD)成功击落了多枚空射来袭导弹^[7-8]。2020 年,洛克希德·马丁公司中标美国陆军间接防御能力-高能激光计划合同(IFPC-HEL),计划在 2022 年完成 300 kW 级激光武器的集成和测试^[9]。

雷神公司(Raytheon)在 2010 年为美国海军研制了功率 33 kW 的 LaWS 系统^[4],在首次水上测试时成功摧毁 4 架 3.2 km 外、飞行速度达 480 km/h 的无人机。2014 年,安装在“庞塞”号的两栖运输舰上,作为“固体激光器快速反应能力”部署在实战环境中,试验中摧毁 1.8 km 的无人机、火箭弹和水面小型舰艇。这是美国首次实战部署激光武器系统,也使美国成为第一个在实战中部署激光武器的国家^[10]。

德国莱茵金属公司(Rheinmetall)在 2012 年研制了总功率 50 kW 的“天空卫士”激光武器演示样机^[11],由 30 kW 和 20 kW 两个功能模块组成。试验中,烧穿 1 km 外的 15 mm 厚钢梁,仅用两三秒就击落 2 km 外数架俯冲的无人机。2016 年展出了陆基欧瑞康激光武器系统,采用 3 个激光发射源使总功率达到 50 kW^[12]。采用的光束叠加技术不仅可以使单个炮塔平台上安装多个激光源实现激光束叠加,也可以控制多个炮塔平台发射激光叠加打击同一个目标。

欧洲导弹集团(MBDA)在 2011 年采用 10 kW 级的固体激光器对约 2 km 处的移动目标进行了动态跟踪和杀伤效果演示。2012 年,采用 4 路光纤激光非相干合束实现 40 kW 输出,经过测试具备对 2 km 外模

拟飞行高度 1 km 目标的打击能力^[13]。

以色列拉斐尔公司 (Rafael) 在 2014 年研制了“铁束”(Iron Beam) 激光武器系统, 功率 20 kW, 可有效对抗近程战术威胁, 包括无人机、火箭弹、炮弹等目标^[4]。

不同于以上中重型激光武器系统, 波音公司在 2015 年研制的“利爪”(CLWS) 系统^[14] 是一种紧凑式、小型化激光武器系统, 功率 2~10 kW, 由光纤激光器、光束导向器、电池组和冷却装置等组成, 拆卸后可由 4 个行李箱大小的容器收纳, 可以集成在战车上, 也可安装在支架上使用。2018 年开始为美国海军陆战

队交付了 5 套集成在联合轻型战术车辆 (JLTV) 上的新一代“利爪”系统, 采用 JLTV 的柴油发电机供电^[15]。据报道, 2019 年该系统已通过 5 项测试, 其间与 100 架无人机进行了对抗^[16]。“利爪”是美国国防部批准的第一种供地面作战人员使用的陆基激光武器。波音公司研制的 5 kW 激光武器系统还应用于美国陆军“远征机动式高能激光”(MEHEL) 系统, 安装在斯特瑞克 (Stryker) 轮式装甲车上, 并于 2019 年开展了相关测试。

表 1 近期战术激光武器代表性进展

Tab.1 Recent typically progress of tactical laser weapons

Company/Country	Year	System	Parameter/kw
Boeing/USA	2012/2019	HELM/CLWS	10/(2, 5)
Lockheed Martin/USA	2012/2017	ADAM/ATHENA	10/60
Raytheon/USA	2014	LaWS	33
Northrop Grumman/USA	2011/2020	MLD/LWSD	105/150
Rheinmetall/Germany	2012/2016	Sky/Oerlikon	50
MBDA/Germany	2012		40
Rafael/Israel	2014	Iron Beam	20

以反火箭弹、导弹、高超声速飞行器为主要研究背景的战术激光武器, 现阶段正将反低慢小目标, 尤其是反无人机作为现实的主要任务, 激光功率普遍在数千瓦至百千瓦之间。其原因一方面是由于无人机的威胁日益增大, 另一方面, 相比火箭弹、炮弹、战术导弹等金属外壳的高速运动目标, 采用复合非金属材料、飞行速度较低的无人机更容易被战术激光武器拦截摧毁。

2 关键技术分析

无人机种类繁多、体积较小、飞行机动灵活, 但飞行速度相对较慢。战术激光武器系统需要具有小型化、机动性好、打击距离数千米等特点, 其关键技术包括高能高功率激光源、跟瞄发射、毁伤效能以及大气传输、供电、高效散热等几个方面, 综合决定了系统的性能和效果。

2.1 高能高功率激光器技术

小型高效高能高光束质量激光源是战术激光武

器系统的核心关键。军事强国对百千瓦级高能激光源开展了大量研究, 包括薄片、板条、平面波导、光纤、碱金属蒸气等激光器技术以及光束合成技术。半导体泵浦的固体激光器可获得高功率能量、高亮度输出, 且具有小型化和高可靠等优点, 是当前战术激光武器技术发展的重点。

2.1.1 薄片激光器技术

薄片激光器是将激光介质制备成厚度约为 100~200 μm、直径约几毫米的圆片, 泵浦光从正面射入, 冷却晶体的背面。晶体因为很薄, 径厚比很大, 可以得到有效的冷却, 且热流方向和激光传输方向基本一致, 使得晶体内的温度分布非常均匀, 克服了热透镜效应, 大大改善了光束质量及功率稳定性。其结构原理如图 1 所示^[17]。

单块薄片增益能力有限, 目前最高输出功率为 6.5 kW, 通常采用多抽运模块或者多个薄片的结构实现更高功率的激光输出。波音公司在 2010 年利用 10 块 Yb:YAG 薄片激光介质, 获得 28 kW 功率输出^[18],

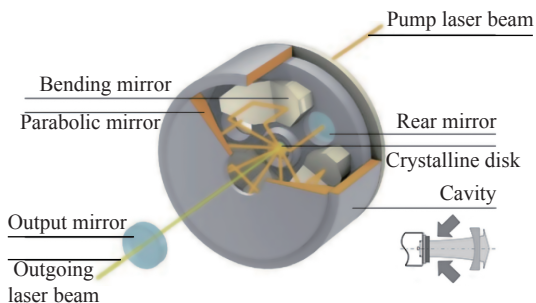


图 1 薄片激光器结构及原理图

Fig.1 Structure and schematic diagram of thin disk laser

2012 年研发出功率为 34 kW、效率在 30% 以上的薄片激光器。2018 年,中国工程物理研究院^[19]设计了新型高功率直接液冷固体薄片激光器,实现了大于 9 kW 的准连续波偏振激光输出,且体积小于 0.4 m³。

2.1.2 板条激光器技术

板条激光器采用“之”字形光路、大面传导冷却技术保证了增益介质的有效散热,部分消除热效应对光束质量的影响,可以在 3 组对称面分别实现端面泵浦、大面泵浦和边泵浦。能够实现高能输出的主要有传导冷却端面抽运板条结构(CCEPS)、板条水冷复合结构(Thinzag)等^[20]。

传导冷却端面抽运板条(CCEPS)结构如图 2 所示,其优点是泵浦光与信号光能流方向一致,一维热分布热效应影响小,抽运光吸收路径长、吸收效率高,



图 2 传导冷却端面抽运板条(CCEPS)的结构

Fig.2 Structure of CCEPS

且扩展性强。

美国诺·格公司^[21]2009 年以 4 个 CCEPS 模块组成一个放大链路,单个模块功率 4 kW,4 个模块形成的单链路功率达 15 kW,并通过 7 路光束相干合成获得 105 kW 激光输出,电光效率达 19%,连续工作时间超过 300 s。

板条水冷复合结构(Thinzag)是将大尺寸的陶瓷 Nd:YAG 薄板条夹于两片熔石英窗口之间形成“三明治”结构,泵浦光泵浦薄板条的 2 个大侧面,如图 3 所示。激光束在石英窗口外表面形成全内反射,以“之”字形光路通过薄板条和冷却液。冷却液以层流方式在薄板条和熔石英之间流动。Thinzag 结构利用全内反射实现激光光路“之”字形传输,对称的泵浦和冷却方式有效地改善了热效应,能够实现高功率高光束质量的激光输出,并且通过增加板条数量或者增加板条长度即可实现定标放大^[22]。

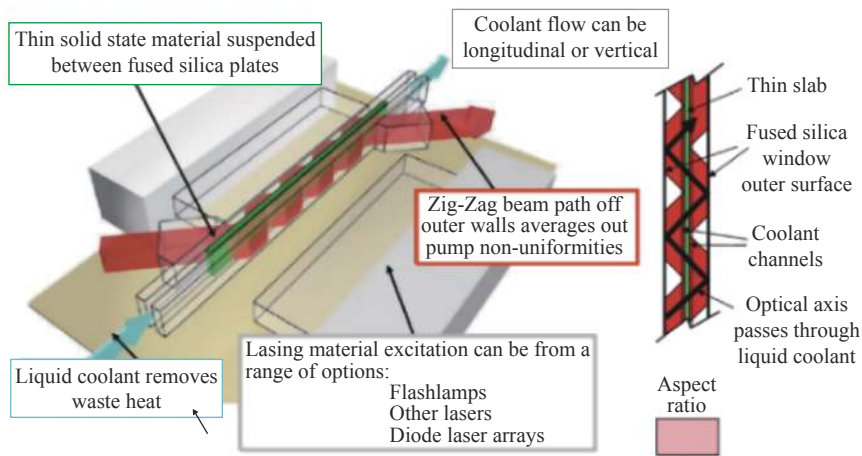


图 3 板条水冷复合结构(Thinzag)激光器

Fig.3 Structure of Thinzag laser

美国达信防务公司^[22](Textron)2010 年通过串联 6 个 17 kW 的双板条陶瓷 Nd:YAG 模块实现了 100 kW 单口径激光输出。通用原子公司(General Atomics)对

该技术进行改进,2015 年实现了 2 个模块 150 kW 的输出,尺寸仅为 1.3 m×0.4 m×0.5 m,质量仅为 1316 kg,光束质量较达信公司更好^[23-25]。

近年来,国内在 高能板条激光器研究上取得了重大进展,与国外差距不断缩小。华北光电技术研究所^[26]2010 年通过 1 级预放 4 级主放的 CCEPS 模块,实现了 11 kW 激光输出,光束质量 4.8,2013 年采用 CCEPS 放大器的 MOPA 单链实现 13 kW 输出,光束质量 β 为 1.7,2020 年通过表层掺杂板条激光放大实现 10.6 kW 输出^[27]。中国工程物理研究院在 2012 年基于 CCEPS 模块实现了 11.3 kW 激光输出^[28],光束质量 7.56 倍衍射极限,2018 年通过改进实现了功率 5 kW 时光束质量 β 为 3.5^[29],并通过分段掺杂板条获得功率 20 kW 激光输出^[30],2020 年采用 Yb:YAG 板条激光技术,克服了板条边缘效应抑制等难点,获得了 22.3 kW 激光功率输出,光束质量优于 2.4 倍衍射极限,是板条激光的重要创新^[31]。中国科学院理化技术研究所^[32]2019 年采用大尺寸板条在低温深冷条件下获得 60 kW 激光输出。

2.1.3 平面波导激光器技术

平面波导激光器融合了板条激光器和光纤激光器的优点又避免了各自的缺点,既能实现大模体运转,又在一维方向起到波导作用,具有结构紧凑、散热效率高与光束质量好的优点,如图 4 所示。纵向的波导结构使激光和泵浦光分别在不同的波导内传输,可以获得更高的泵浦效率以及优异的光束质量。同时,较大的纵横比提高了泵浦能力和热管理性能,通过端面或侧面进行泵浦,利用大面进行散热,可以实现高功率的激光输出。

美国雷神公司采用 Yb:YAG 作为增益介质,

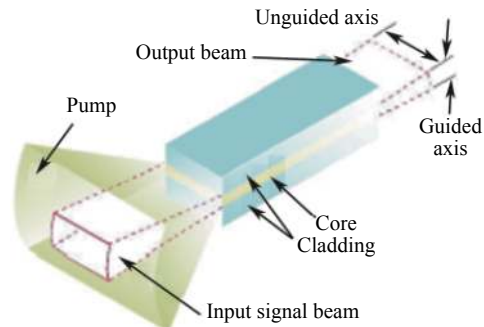


图 4 雷神公司的平面波导激光器结构

Fig.4 Planar wave guide lasers of the Raytheon company

2013 年实现了单个平面波导 14.5 kW 的激光输出(在波导方向近单模),2014 年^[20]实现了单个波导 25 kW 的激光输出,并进行了 100 kW 功率输出的概念设计^[33]。

中国工程物理研究院在平面波导激光方面开展了大量的研究,2015 年实现了 1.5 kW 激光输出^[34],2020 年通过光纤种子和平面波导放大的方案实现了 12 kW 激光输出,通过 AO 校正之后 $\beta < 3$ ^[35]。

2.1.4 光纤激光器技术

光纤激光器以波导结构作为光束产生和传输通道,具有电光效率高、光束质量好以及结构紧凑、柔性传输、热管理方便等优点。随着大模场双包层增益光纤和高亮度泵浦源技术的发展,光纤激光器的输出性能得到了极大提高,在工业、国防等领域得到了广泛应用,2012 年以来的高能激光武器试验主要是基于光纤激光器实现的。近年来的高亮度光纤激光器代表性进展如表 2 所示^[4, 36-38]。

表 2 国内外光纤激光器代表性进展

Tab.2 Representative development of fiber laser at home and abroad

Organization/Country	Year	Power/kW	Beam quality
IPG/USA	2010/2013	10.5/20	Single mode/quasi single mode
Fraunhofer/Germany	2017	4.3	Single mode
Fujikura/Japan	2017	4	Quasi single mode
Tianjin University/China	2017	8	4
CAEP/China	2018	10.6	$2\beta_{FL}$
NUDT/China	2017/2018	10.01/14	1.86/5.37
XIOPM/China	2017	4.62	1.67
SIOM/China	2019	10.14	3.1
Tsinghua University/China	2016	3.89(Raman)	1.49

2.1.5 碱金属激光器技术

半导体泵浦碱金属激光器^[39](DPAL)是以高功率半导体激光作为泵浦源,以碱金属饱和流动蒸气作为增益介质的高能光泵浦流动气体激光器。DPAL 是基于气固融合思想的激光器,兼顾气体激光器高功率高光束质量和固体激光器高增益电驱动小体积的双重优点,具有兆瓦级功率输出的潜力。DPAL 单口径输出,具有高的功重比,具备很强的单口径功率定标放大能力。

近年来,DPAL 得到快速发展,美国利弗莫尔国家实验室(LLNL)在 2017 年实现 34 kW 功率输出^[39],计划在 2019 年实现 120 kW 功率输出^[40]。

2.2 光束合成技术

由于单个激光器输出功率受限,光束合成技术是获取更高功率激光输出的必由之路,主要分为非相干合成、光谱合成以及相干合成。光谱合成和相干合成可以在提高输出功率的同时保持好的光束质量,是激光武器系统最有前景的技术路线之一。

2.2.1 非相干功率合成

非相干合成是指采用合束器、空间交叠等方式实现在目标处激光功率的叠加提升,技术相对简单,但难以保持光束质量。雷神公司研制的 LaWs 系统即采用 6 台光纤激光器通过光纤合束器合成获得 33 kW 功率输出,但光束质量 M^2 达到 17^[41-42]。莱茵金属公司^[42]的光束叠加技术是将每个单元激光器都配备单独的发射光学系统,将各自的激光束发射并聚焦在同一靶斑上,如图 5 所示,实际上是用多台激光武器使多束激光同时以重叠、累积的方式照射同一目标。该方案结构简单,但由于激光束发散、指向稳定性和大气等因素影响,靶目标上合成光束的直径将会显著增

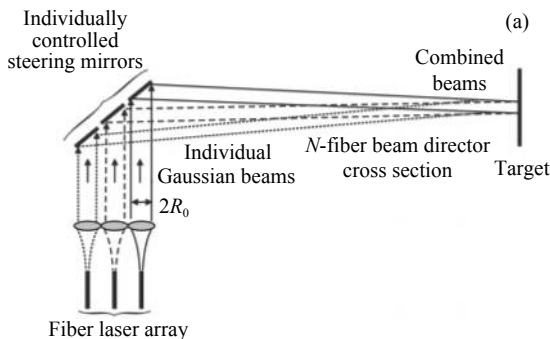


图 5 光束重叠合成示意图

Fig.5 Schematic of beam overlap combining

加,功率密度的提升有限。

欧洲导弹集团^[43]的光束叠加方式是将多个激光束排列成平行光路,使用一个共用的发射系统,将平行的激光束集中发射到目标的同一点上进行叠加,如图 6 所示。该公司的 80 kW 激光武器系统是将 8 台 10 kW 的近单模光纤激光器,通过该方式进行光束耦合叠加。

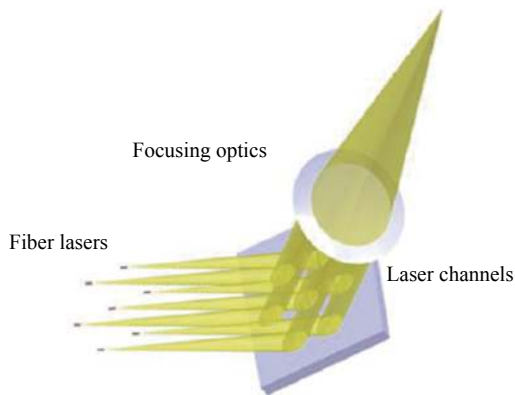


图 6 欧洲导弹集团 (MBDA) 的光束叠加方式

Fig.6 Schematic of MBDA laser beam overlap

2.2.2 光谱合成

光谱合成 (SBC) 是将多束不同波长激光以特定角度入射到色散元件表面上,经过色散元件衍射后以相同角度出射,形成共口径输出,获得高功率高光束质量激光,如图 7 所示。光纤激光器的光谱合成利用了 Yb 离子较宽的增益带来弥补单根光纤激光输出功率的不足,但同时也受限于高功率窄线宽光纤激光源以及与合成元件的匹配。根据色散元件的不同,光谱合成又可以分为棱镜合成、双色镜 (DM) 合成、体布拉格光栅 (VBG) 合成和多层电介质衍射光栅 (MLDG) 合成等技术。

美国洛克希德·马丁公司^[44]和 Aculight 公司 2015

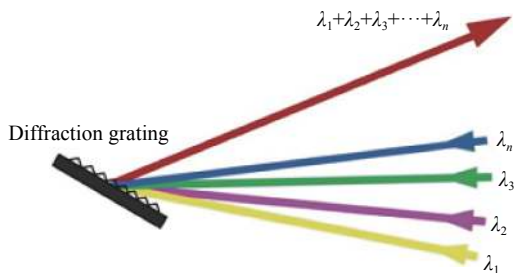


图 7 光谱光束合成示意图

Fig.7 Schematic diagram of spectral beam combining

年采用基于 MOPA 式单路光源的单光栅光谱合成技术, 实现了 96 路 331 W 的光纤激光光谱合成, 电光效率达到 34%, 合束后的总功率达到 30 kW, 光束质量达到 $M^2 = 1.6 \times 1.8$, 2017 年实现了 60 kW 级近衍射极限光谱合成激光输出, 2019 年实现了 150 kW 级光纤光谱合成激光输出^[30]。

国内在光谱合成方面也取得了很大进展, 中国工程物理研究院^[45]2016 年采用基于双光栅色散补偿设计的共孔径光谱合成系统将 10 路功率大于 1 kW 的不同中心波长、 M^2 小于 1.6 的单元光束进行合成, 实现了 9.6 kW 输出, $M^2=2.9$ 。中国航天科技集团^[46]2019 年采用基于透射式双光栅结构的光谱合束系统设计, 实现了 6 路激光的稳定合束, 功率 10.6 kW, 光束质量 $M^2 = 1.92 \times 1.53$ 。中国科学院上海光学精密机械研究所 2016 年^[47]采用多层电介质反射式衍射光栅, 实现了 7 路窄线宽光纤激光光谱合成, 输出功率 11.27 kW, 光束衍射倍率因子小于 2.5, 2018 年^[48]实现了 40 kW 功率输出, $\beta < 3$ 。

2.2.3 相干合成

相干合成^[49]要求各子光束频率和偏振态相同、相位差恒定, 分为锁相相干和光束合成两个部分。根据锁相方式的不同, 分为主动和被动相干合成。主动相干合成是对各子光束进行主动相位控制实现锁相输出, 被动相干合成则是根据不同的耦合机理实现子光束的被动自组织锁相。诺斯罗普·格鲁曼公司 2009 年采用主动锁相结构 (MOPA) 实现 7 路板条激光的相干合成, 总功率达到 105.5 kW, 但是中心主瓣只占总能量的 11%。

根据光束合成方式的不同^[50], 分为分孔径和共孔径相干合成。分孔径相干合成主要有透射式光束拼接和反射式光束拼接两类, 代表性进展是美国麻省理工学院^[51](MIT/LL) 在 2015 年实现 42 路光纤激光相干合成, 输出功率 44 kW, 光束质量近衍射极限。共孔径相干合成包括基于衍射光学元件 (DOE)、相干偏振和基于光波导等技术, 代表性进展是美国空军实验室在 2016 年实现了 5 路 1.2 kW 激光相干合成 4.9 kW 输出^[52]。

国内, 国防科技大学在 2020 年实现了 7.1 kW 光纤激光高效相干合成^[53], 是国内光纤激光相干合成最高功率, 并实现了 107 束光纤激光相干合成^[54], 代表了目前的最高合成路数, 2019 年实现了公里级湍流大

气环境下光纤激光高效相干合成^[55]。

国内外对于高功率连续激光相干合成的研究方兴未艾, 脉冲激光合成逐渐成为新的研究热点。武汉军械士官学校^[1, 56-57]采用角锥互注入锁相和衍射光学阵列合束技术实现了 6 路阵列脉冲固体激光的锁相合成输出, 如图 8 所示, 脉宽 0.5 ms、脉冲能量 15.3 J、重频为 1~20 Hz, 远场光斑是一个独立的主峰, 2014 年研制的 2 级 12 路固体激光合成输出总能量达 30 J, 2015 年研制出 100J 激光器样机, 2017 年通过改进的角锥互注入自约束方案^[58]分别实现了单孔径 25 J/0.5 ms 长脉冲和 3 J/10 ns 级短脉冲输出。

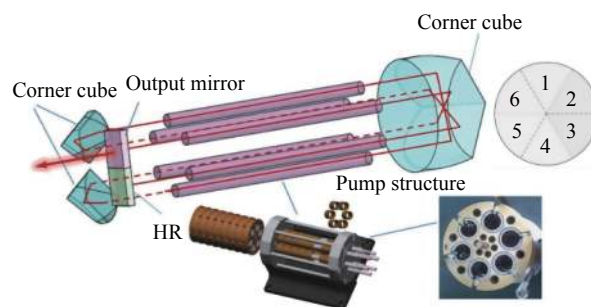


图 8 角锥互注入锁相技术示意图

Fig.8 Schematic diagram of mutual injection locking phase based on corner cube

法国在 2014 年报道了天基脉冲激光器方案^[59], 计划采用数万根单脉冲能量为 1 mJ、重频 > 10 kHz 的光纤激光器, 合成至 100 J 能量。日本^[60]2015 年计划采用国际空间站的宇宙天文台超视场望远镜 (EUSO), 并利用 ICAN 高能激光器实现侦测与打击一体的功能, 如图 9 所示。

阵列分孔径相干合成为激光相控阵的实现提供技术可行性。美国国防部高级研究计划局 (DAPPA) 分别实施了“APPLE”、“Excalibur”和“FLASH”计划, 开展激光相控阵的研究。2013 年“圣剑”(Excalibur) 项目完成 21 单元光纤激光器阵列相控阵系统原理验证。FLASH 计划^[61]旨在进一步开发输出功率为 100 kW 量级, 质量功率比为 2 kg/kW, 超轻质量、接近理想光束质量的高效率激光。

高能固体激光源技术虽然取得了极大的进步, 但面向反无人机的机动高效防御需求, 仍然需要提升功率, 提高小型化和高可靠性。薄片晶体由于储能有限, 以及加工、焊接、热变形等问题限制, 实现百千瓦输出困难较大。板条和平面波导激光器虽然实现了

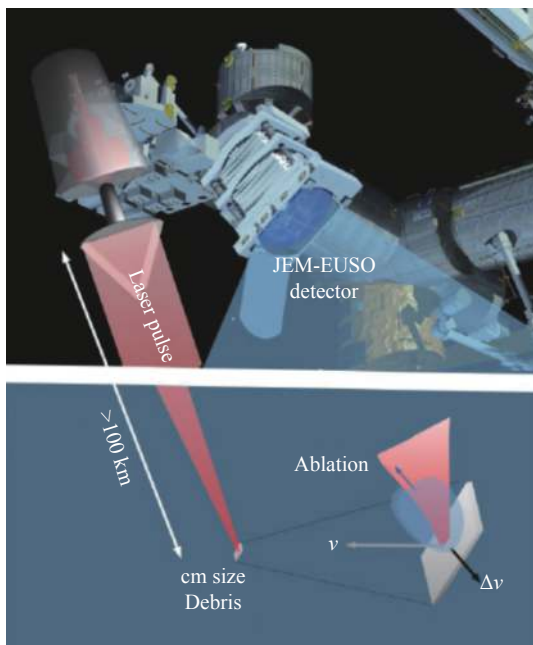


图 9 日本与法国合作的天基激光器方案

Fig.9 Space based laser demonstrated by Japan and France

百千瓦功率输出,但系统紧凑性不够,在功率进一步提升上面临着散热的巨大挑战,然而研究人员仍然不断改进相关技术^[30,62],并且在连续、脉冲等不同输出体制方面有优势。光纤激光器由于热应力、ASE、有限的模体积、非线性等因素,限制了单路激光的输出能力。二极管泵浦碱金属激光器(DPAL)和多路合成光纤激光器能定标到数百千瓦平均功率^[63],而且光束质量好,能获得很高的电光效率和系统功率/质量比、功率/体积比,被寄予厚望。

2.3 跟踪瞄准发射技术

战术激光武器系统要想拦截毁伤目标,必须以一定的功率/能量密度,稳定持续地作用在目标上一个固定位置数秒以上。跟踪瞄准系统使发射系统始终瞄准飞行中的目标,并使光斑锁定在目标的某一固定部位一定时间,从而有效地破坏或摧毁目标。发射系统的作用是把高能激光发射到目标处、并形成尺寸尽可能小的光斑,以便在目标上获得高的功率密度。

目标上的激光功率密度可表示为:

$$W = \frac{P}{\eta S} = \frac{4P}{\eta \pi d^2} \quad (1)$$

式中: W 为目标的功率密度; η 为激光传输效率; d 为目标的光斑直径。

激光远场发散主要由激光束衍射和大气湍流效

应引起,设引起的远场发散角分别为 θ_s 和 θ_t , 则远场综合发散角表示为:

$$\theta = (\theta_s^2 + \theta_t^2)^{1/2} \quad (2)$$

衍射发散角 θ_s 由下式表示:

$$\theta_s = \frac{aM^2\lambda}{D} \quad (3)$$

式中: M^2 为光束质量因子; D 为发射系统有效口径; a 为衍射因子,对于平面波 $a=2.44$,对于高斯光束 $a=4/\pi$,实际光束介于两者之间。对于确定的激光来说,发射系统口径越大,衍射发散角越小。

湍流效应即大气折射率的随机变化对光束形成衍射效应和折射效应,造成远场光斑的扩散和漂移等现象,如图 10 所示。

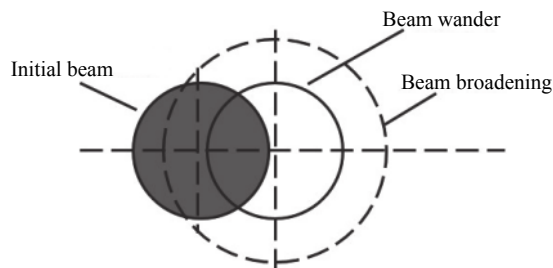


图 10 光斑受大气湍流影响

Fig.10 Influence of atmospheric turbulence on laser beam

根据 Kolmogorov 提出的大气折射率结构函数^[64],用湍流因子 C_n (单位 $m^{-1/3}$) 划定湍流的强弱:当 $C_n > 10^{-6}$ 时为强湍流,当 $10^{-8} < C_n < 10^{-6}$ 时为中等湍流,当 $C_n < 10^{-8}$ 时为弱湍流。

由小尺度湍流产生衍射效应引起的光束扩展角可以近似表示为:

$$\theta_t = 4.01C_n^{6/5}\lambda^{-1/5}L^{3/5} \quad (4)$$

将公式 (3) 和 (4) 代入公式 (2),可以得到远场综合发散角为:

$$\theta = \left[\frac{a^2(M^2)^2\lambda^2}{D^2} + \frac{16.1C_n^{12/5}L^{6/5}}{\lambda^{2/5}} \right]^{1/2} \quad (5)$$

根据公式 (5),得到不同湍流条件和传输距离上激光远场发散角的变化曲线,如图 11 所示。计算采用的发射天线口径 0.2 m,激光波长 1.06 μm ,高斯光束质量因子 1.5。

从图可知:距离增加,远场发散角逐渐变大;湍流强度越大,对发散角的影响越显著。在 5 km 距离,当

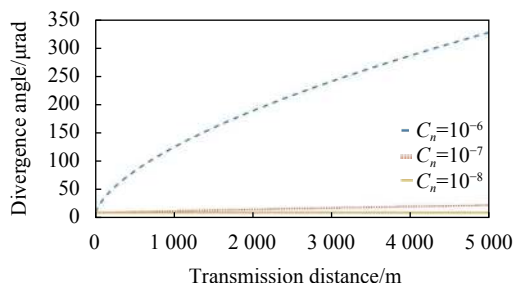


图 11 不同条件下的激光远场发散角变化

Fig.11 Laser far field divergence under different conditions

$C_n=10^{-8}$ 时,综合发散角 $10 \mu\text{rad}$; 当 $C_n=10^{-7}$ 时,综合发散角 $23 \mu\text{rad}$; 当 $C_n=10^{-6}$ 时,综合发散角达到 $330 \mu\text{rad}$ 。因而,不同的传输距离和大气环境对跟瞄精度的要求也不同。

大尺度湍流会导致远场光斑随机晃动,产生光束漂移。由于目标测距误差、光学调焦误差等因素,作用在目标上的光束通常处于离焦状态,会带来光斑扩展。跟瞄抖动使得出射光束在目标上随机晃动。因此,远场光斑的实际作用范围由光束的扩展直径、随机漂移误差、跟瞄抖动误差以及调焦误差 4 个因素共同决定,即在距离为 L 处光斑的理论直径可以表示为:

$$d = \sqrt{(\theta L)^2 + (\sigma_r L)^2 + \sigma_L^2 + \sigma_{\Delta L}^2} \quad (6)$$

式中: θL 为光斑发散直径; σ_r 为跟瞄系统的精度; σ_L 为光斑的随机漂移误差, $\sigma_{\Delta L}$ 为离焦误差。

跟瞄系统的精度要求与目标处激光功率密度、材料的毁伤特性、激光源总功率之间相互关联制约,一般需达到 $10 \mu\text{rad}$ 量级,比普通光电跟踪系统要高出 1 个量级。由公式 (1) 和 (6) 可知,功率密度一定时,目标上的光斑越大,则对跟瞄精度要求越低,但所需的激光总功率越大,反之,目标上的光斑越小,所需要的激光总功率越小,但对跟瞄精度的要求越高。自适应光学技术能够改善大气湍流和热晕效应对激光远场光斑的影响,提升整体效能,但目前受成本、体积和质量等方面的限制,不太适合用于中、小型激光武器系统中。

国内外普遍采用复合轴跟踪瞄准系统来提高跟瞄精度^[65-66],分为 3 级跟踪瞄准过程: (1) 发现、捕获目标,控制跟踪架将目标引入粗跟踪视场; (2) 粗跟踪系统控制跟踪架,精确稳定跟踪飞行目标,确保目标

始终处于精跟踪视场,但是粗跟踪的精度还不能满足打击要求; (3) 精跟踪系统控制快反镜对机械误差和跟踪残差进行修正以满足跟踪精度,并锁定目标上某一固定点,保证打击要求。测距系统实时测量出目标点与激光防御系统之间的距离,控制调焦系统使高能激光聚焦在打击目标上。

激光相控阵技术有望为跟瞄发射系统带来技术革命,但目前受限于损伤阈值尚难以应用于激光武器领域。机械技术与非机械技术相结合的混合跟瞄发射技术可望在近期应用于战术激光武器,从而实现更精准高效的光束控制。

2.4 高效毁伤技术

高效毁伤是指在有限的条件下,针对不同的打击目标,以最小的技术和战术代价使其失去功能。无人机通常搭载有各种光电设备,根据毁伤光电设备或机体结构,分为软杀伤和硬毁伤。针对具体目标,用能量最少、时间最短的方式对目标进行最大限度的破坏,是激光武器破坏杀伤机理的关键技术。

2.4.1 软杀伤技术

软杀伤是指高能激光对目标搭载的光电设备进行干扰和致盲,包括光学成像、红外成像、夜视仪、激光测距、目标指示等,激光通过光电设备的成像光学组件聚焦到感光芯片上,当芯片上的激光能量密度超过探测光强时造成饱和和干扰、超过损伤阈值时造成永久损伤。软杀伤一般只需激光覆盖目标,不需要固定在目标的某一确定位置。

光电探测器的损伤阈值取决于激光辐照时间、激光波长以及探测器结构、感光材料的光学性质以及散热器热耦合品质等。参考文献^[67]描述了 Si、Ge、InSb、HgCdTe 等不同探测器材料的损伤阈值与激光脉宽的关系。

研究表明,连续激光只需要 W/cm^2 量级的功率密度即可对光电探测器造成饱和和干扰,但难以致盲损伤,短脉冲激光由于峰值功率极高,更易对光电探测器致盲损伤,如图 12 所示。ns 脉冲激光由于脉冲宽度小于材料的热弛豫时间,且具有较大的脉冲能量,在辐照感光材料时,激光作用部位的温升极快,可使材料迅速损伤,破坏阈值一般为 J/cm^2 量级。由于光学系统的聚焦作用,一般只需很小的激光功率即可干扰、致盲光电设备。

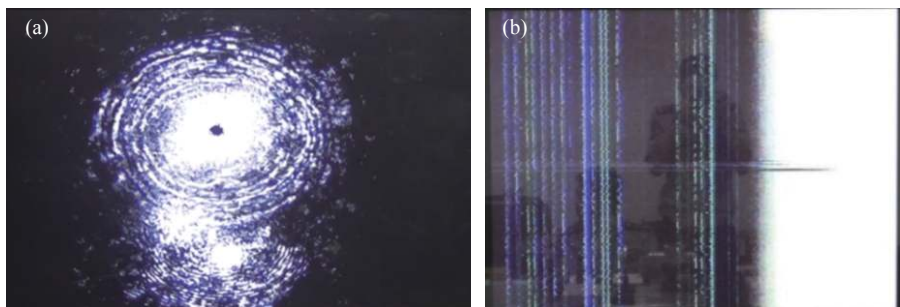


图 12 饱和干扰 (a) 和致盲损伤 (b)

Fig.12 Saturated interference (a) and blinding damage (b)

2.4.2 硬毁伤技术

硬毁伤是指高能激光对无人机机体结构的毁伤,使其断裂或动态失稳坠毁。高能激光需要达到一定的功率密度,持续作用一定时间,积累足够的能量,直到目标材料的特性和状态发生变化,机体失去平衡而坠毁,甚至直接燃烧坠毁。无人机的机体结构广泛使用塑料、树脂、聚碳酸酯、玻璃钢、复合材料、碳纤维等非金属材料来实现小型化和轻质化,相对于火箭弹、导弹等金属壳体具有毁伤阈值较低的特点,主要是热烧蚀机制,在辐照激光功率密度达到约 (100~200)W/cm² 以上时,在 1 s 以内即点燃或融化,如图 13 所示。



图 13 无人机材料被激光点燃

Fig.13 UAV materials ignited by laser

塑料、树脂基材料等高分子材料可持续燃烧直至烧毁殆尽。玻璃钢、复合材料等燃烧之后易碳化,碳化部分难以继续烧蚀,但结构强度大幅下降。高端无人机常采用碳纤维材料进行加固,毁伤阈值明显提高。对于金属和电气部分,毁伤阈值一般需达到功率密度 1 kW/cm²、能量密度 5 kJ/cm²,形成热烧蚀和热力破坏,出现熔融、热解、汽化、穿孔、热变形、断裂等,导致关键部位受到损伤,如图 14 所示。



图 14 钢板被激光烧穿

Fig.14 High power laser burning through steel plate

研究表明^[68],连续/长脉冲激光的复合硬毁伤效能远高于单独连续激光,长脉冲/短脉冲激光的复合软毁伤效能高于单独脉冲激光。复合连续、长脉冲、短脉冲的多功能激光损伤有望成为高能激光反无人机的高效毁伤模式。由于硬毁伤所需要的激光功率/能量密度较高,而软杀伤所需要的激光功率相对较低,而毁伤效能跟作用距离密切相关,如图 15 所示,因此,“远距离干扰、中距离压制、近距离毁伤”的激光综合防御成为战术激光反无人机的有效模式。

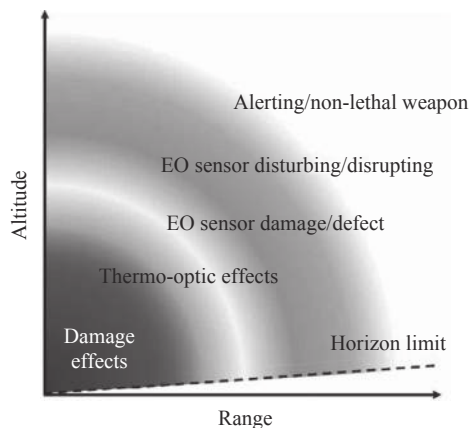


图 15 激光武器在不同距离的作战效果

Fig.15 Killing effect of laser weapon at different distances

3 发展分析

(1) 高能激光源将会向高能高功率、高光束质量、高效能与高功重比、高功体比并重的方向发展。高能高功率高光束质量是实现毁伤效能的基本前提, 高效能、高功重比、高功体比是实用化的必要条件。现有的战术激光武器系统, 有效总功率约数十至百千瓦, 需要进一步提高。同时, 系统的电源和热管理等仍然较大, 功重比在 $35\sim 50\text{ kg}\cdot\text{kW}^{-1}$, 需要装载在中大型平台上, 制约了机动战术应用。美国导弹防御局(MDA)^[39]提出了输出功率 $1\ 000\text{ kW}$ 、功重比 $2\sim 4\text{ kg/kW}$ 高能激光系统需求, 代表了目前的发展目标。

(2) 无人机自身技术的发展亟需高效毁伤战术激光武器系统。小微化、多样化结构增加了发现识别和打击难度, 传感器综合化和机体材料的进步使其更加抗激光打击。高功率连续/高能脉冲复合可调控输出多功能激光器有望实现对无人机的高效防御^[68], 成为新的研究热点, 组束、融合、调控的思想是高能激光源发展的有效途径, 得到高能激光界广泛的认可。

(3) 激光武器体系化、集群化是应对无人机威胁的有效方式。无人机集群化、作战协同化的发展, 大大增加了对抗的难度。单个激光武器系统打击能力有限、防御面较小, 不足以应对不同目标的集群饱和攻击。激光武器的小型机动化发展使集群化打击成为可能, 多功能激光器可以实现针对不同类型目标的复合高效打击。通过体系化、集群化技术, 将不同指标、制式、平台的激光武器组合起来并与探测识别、决策控制系统构成一个有机整体, 实现对防护区域内无人机的综合防御能力。

4 结束语

无人机的威胁日益严重, 其有效防御问题成为了世界性难题。战术激光武器具有打击速度快、作战经费比高、可持续作战、效果可控、附带毁伤小等优势, 不但可以单独使用, 还可以同其他手段协同应用, 形成综合性高效拦截系统。随着技术的进一步发展, 在不远的将来激光武器不但能够高效拦截无人机, 还能够有效摧毁火箭弹、导弹、卫星等目标, 成为真正的颠覆性、杀手锏武器。

参考文献:

- [1] Cheng Yong, Guo Yanlong, Tang Huang, et al. Development trend of tactical laser weapons [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53: 110004. (in Chinese)
- [2] 毅飞冲天. 美国海军成功测试LWSD激光武器, 击毁了一架无人机[EB/OL]. [2020-05-24]. https://m.sohu.com/a/397383643_601259?strategyid=00014.
- [3] Li Yiyong, Wang Jianhua, Li Zhi. Development situation of high-energy laser weapons [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2017, 38(6): 1-6. (in Chinese)
- [4] 刘泽金. 大功率光纤激光研究进展与分析[C]//先进高功率高能激光技术与应用研讨会, 2017.
- [5] 中国指挥与控制学会. 未来战争将进入激光武器时代, 美军发展四大新动向[EB/OL]. [2019-05-15]. https://m.sohu.com/a/314098810_358040.
- [6] Zhang Dongyan, Zhang Jie. The latest development of laser weapon of Lockheed Martin [J]. *Electro-optic Technology Application*, 2019, 34(1): 1-5. (in Chinese)
- [7] Cao Qiusheng, Lu Jing, Liu Jianguang, et al. From SHIELD to look into the anti-missile capability and technical challenge of airborne laser weapon [J]. *Journal of CAEIT*, 2019, 14(5): 443-451. (in Chinese)
- [8] 伍尚慧. 美国高能激光武器最新发展现状及趋势[J]. 军事文摘, 2020(3): 40-44.
- [9] OFweek激光网. 美国陆军授出1.3亿美元 300kW级激光武器合同 [EB/OL]. <https://laser.m.ofweek.com/2020-05/ART-240015-8130-30439931.html>.
- [10] He Qiyi, Zong Siguang. Research progress and consideration of shipborne laser weapon [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(12): 1455-1460. (in Chinese)
- [11] Ludewigt K, Riesbeck Th, Graf A, et al. 50kW laser weapon demonstrator of Rheinmetall Wafe Munition[C]//Proc of SPIE, 2013, 8898: 88980N.
- [12] 王茜, 冯寒亮. 德国莱茵金属公司高能激光的发展现状[J]. 飞航导弹, 2017(7): 3-8.
- [13] Rudolf Protz, Jürgen Zoz, Franz Geidek, et al. High-power beam combining-a step to a future laser weapon system[C]//Proc of SPIE, 2012, 8547: 854708.
- [14] 郑大壮. 波音新力作: 反无人机激光武器系统[J]. *轻兵器*, 2016(4): 53-54.
- [15] 穆作栋. 美国“利爪”反无人机激光武器系统分析. 空天防务观察, 2019(7).
- [16] 欧洲海豹萌新. 美激光武器对战100架无人机, 顷刻击落30架 [EB/OL]. https://m.sohu.com/a/368117668_652261.

- [17] Giesen A, Hügel H, Voss A, et al. Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers [J]. *Applied Physics B*, 1994, 58(5): 365-372.
- [18] Kalisky Y Y, Kalisky O. The status of high-power lasers and their applications in the battlefield [J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(9): 091003.
- [19] Yi Jiayu, Ru Bo, Cao Haixia, et al. Design and experiment on high-power direct-liquid-cooled thin-disk solid-state laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(12): 1201004. (in Chinese)
- [20] Gan Qijun, Jiang Benxue, Zhang Pande, et al. Research progress of high average power solid-state lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54: 010003. (in Chinese)
- [21] McNaught S J, Komine H, Weiss S B, et al. 100kW coherently combined slab MOPAs[C]//Conference on Lasers and Electro Optics, 2009 and 2009 Conference on Quantum Electronics and Laser Science Conference, CLEO/QELS 2009, 2009: 1-2.
- [22] Lei Xiaoli, Sun Ling, Liu Yang, et al. Laser with 100 kW output power developed by the Textron company [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(9): 948-952. (in Chinese)
- [23] Sweetman B. General atomic claims laser breakthrough [J]. *Aviation Week & Space Technology*, 2015, 177(3): 30-31.
- [24] Graham Warwick. General atomics: third-gen electric laser weapon now ready [J]. *Aviation Week & Space Technology*, 2015, 3(1): 30-31.
- [25] An Haixia, Deng Kun, Bi Zhiyue. Miniaturization and lightweight technology of high-power laser equipment [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(3): 321-330. (in Chinese)
- [26] Wang Chao, Tang Xiaojun, Xu Liuqing, et al. Investigation on thermal effect of high power slab laser with 11kW [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(11): 2807-2809. (in Chinese)
- [27] Ding Xiaokang, Liu Yang, Zhang Weiqiao, et al. Yb: YAG surface-doped slab laser amplifier with laser power of 10 kW [J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(2): 157-160. (in Chinese)
- [28] Gao Qingsong, Hu Hao, Pei Zhengping, et al. Design and experiment study of all-solid slab laser amplifier with laser power of 10 kW [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(2): 0202001. (in Chinese)
- [29] Wang Juntao, Tong Lixin, Xu Liu, et al. 5kW end-pumped Nd: YAG slab lasers and beam quality improvement [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(1): 0101003. (in Chinese)
- [30] Tang Xiaojun, Wang Gang, Liu Jiao, et al. Development of high brightness solid-state laser technology [J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(3): 49-55. (in Chinese)
- [31] Gao Qingsong, Zhou Tangjian, Shang Jianli, et al. High efficiency and compact Yb: YAG slab all-solid state laser at room temperature [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32(12): 121009. (in Chinese)
- [32] Guo Y D. Beam quality control technology for high energysolid laser system[C]//Chengdu: The Fourth Symposium on the Development of Atmospheric Optics and Adaptive Optics, 2019. (in Chinese)
- [33] Liu Jiao, Wang Juntao, Zhou Tangjian, et al. Analysis and developments of high-power planar waveguide lasers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(6): 061015. (in Chinese)
- [34] Wang Juntao, Wu Zhenhai, Su Hua, et al. 1.5kW efficient CW Nd:YAG planar waveguide MOPA laser [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(16): 3149-3152.
- [35] 胡浩. 新型高平均功率固体激光研究进展[C]//合肥: 第五届光电防御技术及应用研讨会, 2020.
- [36] Chen Xiaolong, He Yu, Xu Zhongwei, et al. Theoretical and experimental investigation of a 10-kW high-efficiency 1070-nm fiber amplifier [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(10): 1006001. (in Chinese)
- [37] Lin H H, Tang X, Li C Y, et al. Home-made single-fiber laser system achieved 10.6 kW laser output [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(3): 0315001. (in Chinese)
- [38] Gong M L, Yan P, Xiao Q R. High power fiber laser technology and future development[C]//Weihai: Seminar on Advanced High Power High Energy Laser Technology and Application, 2017. (in Chinese)
- [39] Liu Zejin, Wang Hongyan, Xu Xiaojun. High energy diode pumped gas laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(4): 0401001. (in Chinese)
- [40] Syring J. Ballistic missile defense system update[R/OL]. [2016-02-24]. <https://www.csis.org/events/ballistic-missile-defense-system-update-1>.
- [41] Ronald O R. Navy shipboard lasers for surface, air, and missile defense: background and issues for congress[EB/OL]. (2012-06-29)[2014-10-11]. <http://www.crs.gov/>.
- [42] Ren Guoguang, Yi Weiwei, Qu Changhong. High-power fiber lasers and their applications in tactical laser weapons [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(10): 1145-1151. (in Chinese)
- [43] Rudolf Protz, Jürgen Zoz, Franz Geidek, et al. High-power beam combining-a step to a future laser weapon system[C]//High-Power Lasers 2012: Technology and Systems, Proc of SPIE, 2012, 8547: 854708.
- [44] Honea E, Afzal R S, Savage-Leuchs M, et al. Advances in fiber laser spectral beam combining for power scaling[C]//

- Proceedings of SPIE, 2016, 9730: 97300Y.
- [45] Ma Yi, Yan Hong, Peng Wanqing, et al. 9.6kW common aperture spectral beam combination system based on multi-channel narrow-linewidth fiber lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(9): 0901009. (in Chinese)
- [46] Zheng Ye, Zhu Zhanda, Liu Xiaoxi, et al. High-power, high-beam-quality spectral beam combination of six narrow-linewidth fiber amplifiers with two transmission diffraction gratings [J]. *Appl Opt*, 2019, 58(30): 8339-8343.
- [47] Zheng Ye, Yang Yifeng, Zhao Xiang, et al. Research progress on spectral beam combining technology of high-power fiber lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201002. (in Chinese)
- [48] 陈卫标. 光纤激光合成技术现状和展望[C]//合肥: 第五届光电防御技术及应用研讨会, 2020.
- [49] Zhu Mengzhen, Wan Qiang, Liu Xu, et al. Study on coherent characteristic of solid state laser with corner cube resonator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 0906008. (in Chinese)
- [50] Wang Xiaolin, Zhou Pu, Su Rongtao, et al. Current situation, tendency and challenge of coherent combining of high power fiber lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201001. (in Chinese)
- [51] Missile Defense Agency. Department of defense fiscal year(FY)2017 president's budget submission[Z/OL]. [2017-02-24]. <http://www.docin.com/p-1477155476.html>.
- [52] Flores A, Ehrenreich T, Holten R, et al. Multi-kW coherent combining of fiber lasers seeded with pseudo random phase modulated light[C]//SPIE, 2016, 9728: 97281Y.
- [53] 马鹏飞, 马阎星, 粟荣涛, 等. 8 kW级光纤激光优质高效相干合成(简讯)[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(5): 20190577.
- [54] 常洪祥, 常琦, 侯天悦, 等. 百束规模光纤激光相干合成(简讯)[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0916002.
- [55] Zhi Dong, Ma Yanxing, Ma Pengfei, et al. Efficient coherent beam combining of fiber laser array through km-scale turbulent atmosphere [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(10): 1005007. (in Chinese)
- [56] Cheng Y, Liu X, Wan Q, et al. Mutual injection phase locking coherent combination of solid state lasers based on corner cube [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(23): 5150-5152.
- [57] Sun Bin, Zhu Mengzhen, Tan Chaoyong, et al. Latest progress of research on adjust-free solid state laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3244-3251. (in Chinese)
- [58] Cheng Yong, Zhu Mengzhen, Tang Huang, et al. High power solid state laser with corner cube retro-reflectors of mutual-injection confinement[C]//LIDAR Imaging Detection and Target Recognition, Proc of SPIE, 2017, 10605: 106052G.
- [59] Rémi Souldard, Mark N Quinn, Toshiki Tajima, et al. ICAN: A novel laser architecture for space debris removal [J]. *Acta Astronautica*, 2014, 105: 192-200.
- [60] Toshikazu Ebisuzaki, Mark N Quinn, Satoshi Wada, et al. Demonstration designs for the remediation of space debris from the international Space Station [J]. *Acta Astronautica*, 2015, 112: 102-113.
- [61] Optics Org. DARPA extends laser weapon range[EB/OL]. <http://optics.org/news/5/3/13>.
- [62] Wang Huihua, Lin Longxin, Ye Xin. Progress and Tendency of high power slab lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(7): 20190456. (in Chinese)
- [63] Ren Guoguang, Yi Weiwei, Qi Yu, et al. U. S. theater and strategic UVA-Borne laser weapon [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54: 100002. (in Chinese)
- [64] Yi Quan, Sun Xianzhi, Yang Jianchang, et al. Analysis on the accuracy of tactical laser weapon [J]. *Fire Control & Command Control*, 2018, 43(6): 98-102. (in Chinese)
- [65] Zhao Lei, Ji Ming, Zhao Zhenhai, et al. Primary-precise compounded control for stabilized platform in shipborne laser weapon [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(1): 86-92. (in Chinese)
- [66] Xu Guoliang, Zhao Shubin, Wang Yong. Technology analysis of shipborne high-energy laser weapon systems intercepting UAVs [J]. *Modern Defence Technology*, 2015, 43(5): 12-17. (in Chinese)
- [67] David H Titterton. Military Laser Technology and Systems[M]. Cheng Yong translated. Beijing: National Defense Press, 2018. (in Chinese)
- [68] Cheng Yong, Zhu Mengzhen, Ma Yunfeng, et al. Mechanism and effects of complex laser ablation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(11): 1105005. (in Chinese)