

Requirements for Directed Infrared Countermeasures Laser

Yang Yin

The First Aircraft Institute, AVIC, Xi'an Shaanxi
Email: yugiwangok@aliyun.com

Received: Jun. 22nd, 2018; accepted: Jul. 9th, 2018; published: Jul. 17th, 2018

Abstract

Contents of abstract performance requirements for DIRCM laser sources, operating in the mid-IR, providing protection of airborne platforms from heat-seeking missiles are reviewed. The critical performance characteristic for a countermeasures laser is "useful energy on target", which requires the laser to generate high brightness output in the appropriate spectral bands with rapid turn-on time. Integration with a compact beam director places an upper limit on the beam quality of the laser output. The key driver for the detailed laser design is to maximize the overall wall plug efficiency in order to minimize the complexity and volume, in turn maximizing the reliability and reducing the cost. Particular routes to reduce the thermal management system for the laser produce the single largest improvement in overall wall plug efficiency.

Keywords

DIRCM, Thulium Laser, OPO, QCLs

光电对抗对激光光源的要求

尹扬

中国航空工业集团公司第一飞机设计研究院, 陕西 西安
Email: yugiwangok@aliyun.com

收稿日期: 2018年6月22日; 录用日期: 2018年7月9日; 发布日期: 2018年7月17日

摘要

综述了定向红外对抗系统激光光源在中红外波段的性能要求, 以及对热寻的导弹机载平台的防护。激光对抗的关键性能特征是“目标上有用的能量”这要求激光器在适当的光谱带以较快的开启时间产生高亮度

输出。紧凑型光束定向器的集成对激光输出的光束质量设置了上限。详细设计激光器的关键驱动力是最大限度的提高电光转化的效率，以最大限度减少复杂性和体积，从而最大限度提高可靠性并降低成本。最大限度改进在特定的路线激光器的热管理系统产生的电光转换效率单一问题。

关键词

定向红外对抗系统, 铥激光器, 光参量振荡器, 量子级联激光器

Copyright © 2018 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

定向红外对抗(DIRCM)系统被用来保护机载平台免受红外制导(寻热)导弹的威胁,主要的威胁是单兵防空系统(MANPADs) [1]。定向红外对抗系统通过探测导弹发射,确定其是否是威胁,并控制一个或多个跟瞄装置,跟踪并发射能量束使导弹偏离轨道。调制后的光束直接射向导弹导引头,对其进行干扰并使导弹远离飞机。这一切都发生在几秒钟之内。

诺斯罗普·格鲁门公司的 AAQ-24(V)NEMESIS 系统使用激光作为干扰光源来保护军用飞机,并正在推广应用到民用飞机上。诺斯罗普·格鲁门公司的定向红外对抗系统中使用的激光器 Viper™为红外对抗激光器和未来激光器的开发设定了基准。根据他们的宣传材料,包括所有的波长转换和扩束的光学器件、控制器和电源等所有组件整体直径为 330 mm, 高为 50 mm, 且重量不到 4.5 kg [1]。

中红外激光器已经成为并将继续成为学术界、工业界和军事研究的一个活跃的领域[2]。在过去的十年中,特别是在光纤和半导体激光器领域已经出现了许多重要的技术发展。

下一代红外对抗激光器的可选技术包括光纤泵浦固体激光器、光泵浦半导体激光器和量子级联半导体激光器[3]-[8]。本文对工作中在中红外 2~5 μm 波段的激光器详细设计中的关键驱动因素进行了阐述,来实现更加紧凑和更简单的结构以适应未来的红外对抗激光源。

本文综述了激光器被应用于定向红外对抗的关键系统任务中时的关键性能要求。本文还对激光器详细设计中的关键驱动因素进行了回顾,已实现更加紧凑和更简单的结构以适应未来的红外对抗激光源。

2. 定向红外对抗激光光源的要求

激光器在一系列军事应用中提供了许多有用的性能(空间和时间相干性、单色性)。对于定向红外对抗的应用来说,关键的性能特征是“目标上有用的能量”,以便对抗系统快速可靠的击败威胁。这个关键的性能特征受激光源和光束导向器的组合的影响。定向红外对抗系统对激光光源的要求主要有以下几点。

2.1. 光谱覆盖

定向红外对抗系统通常需要多波长输出来匹配 2~5 μm 的中红外光谱区域中的大气透射窗口。在大气传输窗口内实现波长多样性的激光源将不易受到威胁对象所采取的任何反对抗措施的影响。波长多样性的手段之一是由激光源产生宽带输出,同时填充大气传输窗口的带宽。或者波段上的快速波长调谐可以提供多样性,也可以通过多个激光器设备实现多样性波长输出。

2.2. 光束质量

到达远场目标上的激光光斑大小取决于激光光源的光束发散角[9]。一定激光输出功率情况下，光束发散角越小，到达目标上的辐射强度越大。但激光束发散必须与激光指向器的指向精度相匹配，以便将波束中心抖动对到达目标上能量的影响降到最低。此外，对紧凑型向器的激光指向器的要求限制了激光的通光口径，因此近场光束直径需要尽可能的小。这种远场发散角和近场光束直径的要求对激光器最长波长输出提出了最严格的光束质量要求。一般来说，这个输出应该提供一个尽可能接近衍射极限的光束(光束质量因子 M^2 尽可能接近 1)，以便减少激光输出口径和激光指向器激光路径的孔径大小。

2.3. 性能

在受到威胁时必须要有合适的激光功率来满足对抗的需求。显然激光功率水平取决于光束发射要求实现到达目标上的激光辐射强度足够强。通常需要数瓦左右的功率水平进行带内的欺骗或欺骗威胁，而不是数十甚至数百千瓦的带外损伤对抗激光。

2.4. 开启时间

从识别和追踪威胁到部署干扰措施，击败寻热导弹威胁的时间很短，通常不到十秒。激光达到全功率的输出速度越快，被识别到的威胁就会越快被干扰。一个数十毫秒的开启时间可最大限度的减少激光对威胁干扰的总体时间。

2.5. 调制/占空比

激光源必须持续输出才足以应对来袭威胁。理想的定向红外对抗(DIRCM)激光器提供连续的激光输出，就很容易在很宽的范围内调整波形的占空比范围，降低对输出光束特性的影响。活性介质中热负荷敏感性会影响调整范围，而整个激光系统的热负荷决定了热管理的要求，从而影响可持续运行的使用率。最大限度的减少激光对热负载变化的敏感性将能优化调制/占空比范围。

2.6. 功率

军用客户群体一般要求在不会影响到关键的激光性能参数情况下提高激光光源的整体电光转化效率。最大限度的提高整体电光转化效率可以改善安装系统的要求，例如来自平台的原动力。提高整体电光转化效率还可以减少激光系统的体积和质量，进而减少对抗系统的体积和质量。整体电光转化效率的提高可降低对热管理的要求，进而减小功耗。同时，还减少了关键部件中的热效应，增加了激光系统的可靠性。此外，提高整体电光转化效率将降低系统复杂性和部件数量，从而使得激光系统的总体成本降低。“目标上有用的能量”取决于远场光束发散和带内功率。整体电光转化效率决定了激光系统的质量/体积、可靠性以及最终成本。

3. 候选技术

在定向红外对抗系统中应用的激光光源是工作在 2~5 μm 中红外波段的激光器。传统的固体激光器设计已经受到掺杂剂和光学增益介质主体材料的限制，在感兴趣的波段缺乏提供直接发射的有效固体光源。最有效的光泵浦源是以 8xx nm 或 9xx nm 发射的近红外激光二极管。固体激光器用作频率变换器，使用光学谐振器来吸收激光二极管泵浦光并产生频移激光跃迁波长，以产生接近衍射极限的输出光束。激光二极管的转换效率和输出波长都是依赖温度的，因此激光二极管泵浦源的温度控制通常是固体激光热管理系统的主要组成部分。

使用这些泵浦源的中红外激光跃迁会随着激光波长的增加而产生越来越严重的量子缺陷。这表现为激光器主体材料中的热负荷增加, 导致更强的聚焦热透镜, 以及增加的热感应像差, 降低激光器性能。因为激光跃迁的转换效率, 整体电光转换效率与量子缺陷的量级成反比。使用非线性波长转换或从带外泵浦激光产生中红外辐射可以消除这种量子缺陷的问题。此外, 在相对较宽的频谱范围内对波长多样性的要求导致第一代定向红外对抗光源使用具有非线性波长转换的带外泵浦激光器来产生带内辐射激光。

带外泵浦激光器的首选是钕掺杂钇铝石榴石(Nd:YAG), 它在军事和商业上都有广泛的应用, 可能是迄今为止最可靠的激光器。YAG 是一种机械强度较高的主体材料, 可在高脉冲能量下进行激光发射, 并且具有较高的平均功率。利用钕掺杂的钒酸钇(Nd:YAO₄), 与 Nd:YAG 相比, 利用其优异的吸收和反射截面, 可实现高重复率或更效率的连续激光。钕离子初级激光跃迁在 1.064 μm , 这需要使用光学参量振荡器的级联非线性波长转换以产生 2~5 μm 范围内的多个波长。使用 Q 开关泵浦激光产生高功率脉冲是实现 OPO 阶段中的效率转换的最简单的方法。同时还要在波长覆盖范围、功率、复杂性和成本之间进行权衡。

近年来光纤激光器发展迅速[10]。光纤激光器是高效率、高强度的辐射源。光纤的几何形状能够减轻固体所面临的许多热问题; 大的表面积在散热方面是非常有效的, 而独立于热负荷的单模光纤源可实现接近衍射极限的光束质量。由于纤芯尺寸较小(单模阶跃折射率光纤的阶数为 10 μm), 光纤激光器几何结构有利于连续波或低脉冲能量操作。光纤传输为激光器的装备提供了显著的灵活性。大多数光纤激光器都是基于掺杂石英的光纤, 这是一种机械强度高的材料, 可以大规模制造以应用于电信业。这些优势为强大的军事应用提供了巨大的潜力。因此光纤激光器现在成为 IRCM 激光器的泵浦源的研究热点。

类似地, 半导体激光器的快速发展实现了直接产生中红外激光输出的光泵浦和电泵浦技术。电泵浦技术原则上在器件效率(电输入功率直接转换为波长)方面提供了可靠的解决方案。因为中红外半导体激光器直接产生输出光束, 所以它的功率是关键的光学参数。半导体激光器本身就是低峰值功率连续波或准连续波器件。具有低热负载的高效器件能够在大规模的占空比和波形范围内进行调整。半导体激光技术的低峰值功率特性显著降低了光学镀膜的损伤阈值要求。

4. 激光器影响因素

为了达到生产标准设计中的规定性能, 基本(环境)性能受以下因素影响:

- **设计:** 为了提供可重复的性能, 需要提供基于实验室的最佳结果。
- **制造:** 激光器的生产方案通常是由高素质的工程师使用模块组件进行手工制作完成, 其中组件在生产线上大批量快速组装。必须考虑到在批量使用时, 子组件质量的自然变化。
- **环境:** 激光系统设计也因需要在军用运行环境下运行而受到限制。主要限制是:

温度, 典型的范围是-40°C 到 60°C, 温度影响激光关键参数包括功率、光束质量和视轴, 并且可能使热管理明显的复杂化。

振动, 激光器必须能够在典型平台的恶劣振动环境下工作。振动会影响到激光关键参数包括视轴、功率和光束质量。

高度, 这里主要的影响是使用强制风冷的激光系统作为热管理系统的一部分, 随着高度降低空气压力减少。第二个影响是对底盘的压力形变, 因此光束路径的改变是由高度引起的压力差产生的。

- **使用寿命终止:** 在典型的固态激光器中, 关键部件是激光二极管泵浦源。在首次集成时, 考虑到激光二极管光输出功率随时间的下降, 在使用寿命开始时提供过多的泵功率, 以便使使用寿命结束时仍然能达到规定的性能。或者需要一个额外的控制级来增加激光二极管驱动电源, 以保持恒定的光输出。

为了适应这些极端情况，制造商通常在环境范围内对激光特性进行详细建模，并引入足够的设计余量以确保在运行和使用寿命中的最低性能。

就可靠性而言，数千小时的平均时间(MIBF)和十年的储存寿命，是军用机载激光系统的典型要求。最大限度的减少关键部位的热负荷，从而使 MIBF 数据最大化。类似地，减少整体部件数量以增强激光系统的整体 MTBF 数据。

减少热管理要求的一个方法是在高温下操作，前提是加热比冷却功率要求低。这是激光二极管泵浦源用于军用固体激光器的标准技术。激光二极管的电光转换效率与整个激光系统的峰值功率要求之间有一个折中。第二个方法是以热容模式运行，使用激光二极管泵源(或半导体激光器直接产生源)的自热来维持运行期间的温度。两种解决方案仍然都需要主动温度控制，因此对整体部件数量和复杂性没有显著的影响。

5. 总结

从定向红外对抗系统的角度，对定向红外对抗系统对激光器的要求，激光器发展技术以及激光器限制条件进行了分析。尤其是为了最大化“目标上有用的能量”，激光必须具有以下一般属性：

- 在中红外 2~5 μm 波段中同时多波长输出，具有波长多样性；
- 高功率输出；
- 近波束抖动；
- 高运行工作周期。

紧凑型光束导向器的集成对激光输出的光束质量有最大值要求，激光系统必须提供在机载平台所经历的整个环境中需要的性能。此外，还有一个要求是最大限度地提高激光器整体电光转换效率，而不会影响任何关键的光学功能优势：

- 降低平台的主要功率需求；
- 减少质量/体积；
- 降低复杂性和成本；
- 增强可靠性；
- 改善整个环境的性能。

降低成本也是激光器制造商和最终用户的主要驱动力。

参考文献

- [1] Northrop Grumman Corporation Website.
http://www.es.northropgrumman.com/countermanpads/tested_proven/multi_band.html
- [2] Titterton, D.H. (2007) A Consideration of the Requirements for Laser Devices Used in Countermeasures Applications. *Proc. of SPIE*, **6451**, 64511Q. <https://doi.org/10.1117/12.705655>
- [3] Sijan, A. (2009) Development of Military Lasers for Optical Countermeasures in the Mid-IR. *Proc. of SPIE*, **7483**, 748304. <https://doi.org/10.1117/12.835439>
- [4] Wu, J., Jiang, S., Luo, T., Geng, J., Peyghambarian, N. and Barnes, N.P. (2006) Efficient Thulium-Doped 2- μm Germinate Fibre Laser. *IEEE Photonics Technology Letters*, **18**, 334-336. <https://doi.org/10.1109/LPT.2005.861970>
- [5] Frith, G., Carter, A., Samson, B. and Town, G. (2009) Design Considerations for Short-Wavelength Operation of 790-nm-pumped Tm-Doped Fibres. *Applied Optics*, **48**, 5072-5075. <https://doi.org/10.1364/AO.48.005072>
- [6] Moulton, P.F., Rines, G.A., Slobodtchikov, E.V., Wall, K.F., Frith, G., Samson, B. and Carter, A.L.G. (2009) Tm-Doped Fiber Lasers: Fundamentals and Power Scaling. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **15**, 85-92. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2008.2010719>
- [7] Fan, T.Y., Huber, G., Byer, R.L. and Mitzscherlich, P. (1988) Spectroscopy and Diode Laser-Pumped Operation of Tm,

-
- Ho: YAG. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **24**, 924-933. <https://doi.org/10.1109/3.213>
- [8] Frith, G., Carter, A., Samson, B., Faroni, J., Farley, K., Tankala, K. and Town, G.E. (2010) Mitigation of Photodegradation in 790-nm-Pumped Tm-Doped Fibres. *Proc. of SPIE*, **7580**, 75800A. <https://doi.org/10.1117/12.846230>
- [9] Lippert, E., Nicolas, S., Arisholm, G., Stenersen, K. and Rustad, G. (2006) Midinfrared Laser Source with High Power and Beam Quality. *Applied Optics*, **45**, 3839-3845. <https://doi.org/10.1364/AO.45.003839>
- [10] Elder, I. (2009) Thulium Fibre Laser Pumped Mid-IR Source. *Proc. of SPIE*, **7325**, 73250I. <https://doi.org/10.1117/12.818553>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7567, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: app@hanspub.org