

文章编号:1007-1180(2011)11-0001-07

# 光电对抗用激光器技术

郭汝海, 赵新宇, 马 军

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 激光器技术在最近几年发展迅猛, 各种规格的激光源是各种军民两用光电设备的关键部件之一。在定向能激光武器中, 不断进步的激光器技术大大提高了系统的作战效果, 如提高了作战距离和打击精度。现代固体激光器技术由于具有较高的光电转换效率和较小的重量体积, 已经成为了光电对抗用的理想光源。然而, 任何系统的最终性能还受不同子系统相互配合的限制, 对于激光系统评价的关键性能参数还要归结于“到靶有效激光能量密度”。本文对光电对抗用激光器技术进行了回顾, 同时讨论了激光器用于光电对抗系统所必备的技术条件, 以便激光器和整个系统能够具备较好的兼容性, 从而能够最大化地利用激光源所发出的能量。

**关键词:** 光电对抗; 激光器; 打击机制; 光束传输

中图分类号: TN977

文献标识码: A

**DOI:** 10.3788/OMEI20112811.0001

## Technical Review for Lasers Used in Optical Countermeasure

GUO Ru-hai, ZHAO Xin-yu, MA Jun

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** The development of laser technology is very fast in recent years. A variety of laser sources have been regarded as the key component in many optoelectronic devices. For directed energy weapon, the progress of laser technology has greatly improved the tactical effectiveness, such as increasing the range and strike precision. At the same time, the modern solid-state laser has become the ideal optical source for optical countermeasure, because it has high photoelectric conversion efficiency and small volume or weight. However, the total performance is limited by the mutual cooperation between different subsystems. The optical countermeasure is a complex technique after

\*基金项目: 中国科学院知识创新工程领域前沿资助项目

many years development. The key factor to evaluate the laser weapon can be formulated as laser energy density to target. The technical review for laser used in optical countermeasure is briefly introduced in this paper. Especially the essential techniques are discussed for the laser used in the optical countermeasure system, so that the laser has a better compatibility to total system. In this way, the maximum energy emitted by the laser source can be utilized.

**Keywords:** optical countermeasure; laser; defeat mechanism; beam transmissions

## 1 引言

光电对抗技术是指敌对双方利用各种技术手段在光波段进行的争夺,以削弱、破坏或者摧毁敌方侦察装备和光电制导武器的作战效能,并保证己方光电装备及制导武器作战效能的正常发挥而采取的战术技术行动<sup>[1]</sup>。

从1960年梅曼发明第一台红宝石激光器开始,由于其特有的性质已经广泛地应用于医疗、工程、娱乐和科研等领域。同时,越来越多的国家也进行了激光器的军事应用开发,这就衍生了许多典型的武器应用,如激光制导的导弹。将激光器应用到军事目标上具有许多明显的优势,如精确的打击能力、增强的目标辨别与识别能力、战斗损伤指示与评估、多任务的发射能力和反追踪的能力<sup>[2-4]</sup>。

本文回顾了一些光电对抗用激光器,按干扰等级从致眩到摧毁设备,激光功率将要跨越几个数量级,同时也包含光束定向器的指向精度。其他一些军事应用包括化学物质传感和目标的辨别功能。

## 2 光电对抗系统

一般来讲,激光武器系统具有战术打击能力,即能够以较紧凑的技术体制实现对敌目标的直接摧毁,到目前为止仍然是光电对抗系统的发展目标。限于目前激光器技术的发展水平,已经开发了许多其他更为实际的光电对抗应用。例如,激光器技术可以用来致眩光学系统(图1给出了眩晕热成像探测器),也就等价于隐蔽了目标,图2给出了摧毁目标的照片,也就等同于“远程的切割与焊接”。上述

两种应用具有许多相似性,例如:

- 目标告警装置;
- 运动目标的精确制导跟踪;
- 在车载、舰载或机载平台上激光束具有较高的指向稳定性;
- 激光束能够定位在目标的脆弱部位;
- 持续稳定地保持激光束照射目标,直至达到作战效果。

当然,由于作战效果的不同,它的打击机制也不同,通常致眩的干扰效果和目标摧毁的作战效果



图1 探测器致眩



图2 目标摧毁

所需的激光器功率相差几个数量级，从几瓦到数十千瓦以上。下面对打击机制进行简单介绍。

## 2.1 打击机制

两个基本的打击机制用于激光器系统，如图3所示，称为带内干扰和带外干扰，将在下面予以论述。

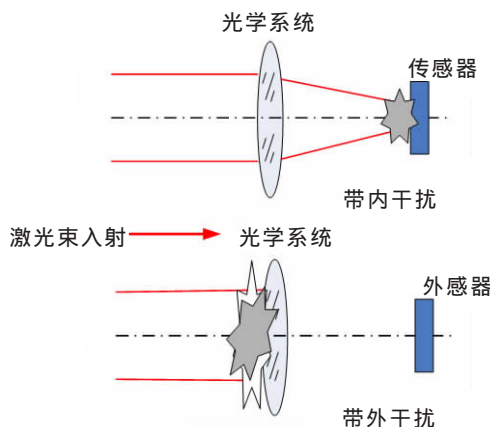


图3 带内和带外干扰体制

### (1) 带内干扰技术

带内干扰方法在某种程度上已经是较成熟的技术，这种干扰方法的先决条件就是下面两个条件必须得到满足：

- 目标传感器正看向对抗系统；
- 目标的光学系统必须对入射激光波长透明，

即激光能量能够传输到达探测器。

假设这些条件满足，就有可能用非常小功率的激光器打击传感器。打击技术可以以入射到该传感器上的光能来进行分类：

- 致眩，使目标传感器饱和；
- 欺骗，产生错误的目标运动信息，在激光干扰机中开发；
- 损伤，激光能量被传感器光学系统会聚成很小的光斑，在易损元件上导致元器件破坏或损伤，因为超过了激光损伤阈值。

这个打击机制可以通过任何适合强度的激光源产生；然而，激光器通常需要并不复杂的较小的光学对抗系统，这样就更加有效。产生前两个效果的平均激光功率正常情况下需要几瓦量级，而最后一

种情况需要激光脉冲能量应具有焦耳量级。

### (2) 带外干扰技术

带外干扰技术具有更加灵活的工作适应性，因为它不需要选定特定的目标。然而，这就导致了激光器具有不同于带内干扰的输出特性。这种情况下，基本的打击机制就是目标传感器组件或者子系统快速吸收激光能量。这个子系统可以是光学设备或部分光机结构；所有这些只需要子系统吸收激光束传输的光能，以使它失效。破坏机制如下：

- 破裂；
- 剥落；
- 流体冲击；
- 熔化；
- 气化。

破裂可以通过较少的激光器输出能量来达到，输出能量为几十千瓦，而熔化和气化打击机制就和“星球大战”技术联系在一起，需要几百千瓦或者更高激光功率。后面破坏机制主要用于损伤和破坏飞行器外壳。这主要是因为打击机制是基于激光能量的吸收，因而不需要事先已知目标的特性，因此可以为防御系统提供更灵活的工作方式。

## 3 激光器技术

光电对抗用激光器技术具有如下优势：

- 光速的作用；
- 优势同时多任务；
- 定向瞄准能力；
- 精确打击能力，间接损伤可忽略；
- 低耗费比，特别是和传统武器比；
- 很小的后勤需求。

激光器技术的主要不足集中在以下几点：

- 目标上有限的作用时间；
- 需要精确指向光学系统；
- 缺乏“全天候”作战能力，容易受天气状况影响（雨雪风沙等恶劣天气）。

为了能够实现激光器能量的有效发射，必须使

激光束在内光路传输过程中引入最小的光学像差,在通过大气传输时引入最小的衰减。大气衰减主要应该选择合适的激光器波长使其处于所谓的“大气窗口”中,范围可以从可见到远红外激光器,如果波长不合适,将使激光束在传输过程中消失或产生严重的散焦和偏转。

激光束通过大气传输,传输的光束波前将由于大气湍流而发生畸变,湍流中各单元在大气中的折射率不尽相同。这种波前畸变将会改变光束形状和亮度,包括空间的位置。严重大气湍流下对应几个现象:

- 建立和破坏干涉造成光束破碎,从而产生闪烁;
- 光束展宽,由于光束空间形状的改变,导致发散角增加;
- 质心运动,这是由于折射率的改变导致了光束的抖动。

这些现象都会改变目标对激光的接收,以至于很难达到较高的跟踪精度。目前发展的自适应光学技术可以用于补偿这些效应。

下面将综合阐述适合于“大气窗口”的各个波段激光器。

#### (1) 可见光波段激光器

染料激光技术是非常通用的,可以发射脉冲或者连续激光。光学结构可以用弧光灯泵浦,也可以用激光泵浦增益介质中的染料分子。而且,液体或者固体增益介质都可以用来产生激光;这种技术主要应用在带内干扰系统上。

最近研发的激光器染料已经可以有效地扩展到近红外。另外,技术的进步已经极大地提升了性能,特别是固体和液体相位的工作寿命。

红宝石激光器发射这个波段的红色端,由于它的“三能级”激光能级结构,具有受限的工作灵活性。同样,还有惰性气体和金属蒸气激光器可以直接产生这个波段,但是这些激光器在一定程度上效率较低。

现代固体激光技术包括从激光二极管中直接产

生,还有的利用非线性技术,例如从近红外激光输出的倍频技术,或利用光学参量振荡技术进行频率转换。非线性技术的利用非常具有吸引力,主要是由于具有非常宽的发射谱线,同时也可能得到极窄的线宽,但是系统就会变得更加复杂。结果,这样的激光系统非常昂贵并且受限于较低的输出功率;而且高能脉冲的产生也会变得非常困难。同样,激光二极管可以作为最好的连续波(CW)或者近CW发射器。二极管可以提供蓝光或更短波长辐射,这种技术也很适合致眩型的系统。

拉曼激光技术随着固态拉曼材料的发展而快速发展,如硝酸钡。这些设备趋向于发射较小的功率,适合于致眩传感器;而且,仔细设计可以产生多波长输出。位于该波段的激光设备更适合于带内干扰机制。

#### (2) 近红外激光器

发射这个波段激光( $\sim 1\mu\text{m}$ )的激光源都是固体激光器,既可以连续工作也可以脉冲工作。而且,增益介质的光学损耗可以控制产生非常短的脉冲,既可以通过Q开关也可以通过锁模。这些不同的工作模式意味着固体激光器是非线性频率转换理想的泵浦源。

光纤激光器是近期固体激光器技术的重要发展对象。它们趋向于在这个谱段发射连续光束,而且这个技术非常灵活,可以达到非常高的转换效率。光纤激光已经用于产生多波长输出,同时,利用相干合成技术<sup>[5]</sup>,就可以得到非常紧凑和高效的高功率光源,具有输出数十千瓦功率的能力,非常适合于带外干扰系统。

薄片激光器技术是最近开发的传统激光系统,增益介质为薄片状,可以在后表面进行均匀有效制冷,因此产生高功率高光束质量的激光。这些设备通常为二极管泵浦,具有非常紧凑的结构,可以产生数千瓦输出的激光束。

二极管激光器在这个波段是非常有效的发射光源,可以工作在CW或者近CW,虽然脉冲激光源可能更为有效。这种技术经常用于泵浦各种类型的



固态激光器。而且，多个二极管可以进行相干合成，形成高功率光束。然而，应用以前必须对其进行光束整形，以提供适合的光束分布。这个波段的低功率激光源适合于传感器的带内干扰，而高功率激光源可以直接用于带外干扰。

### (3) 中短波红外激光器

利用稀土离子，如铟、铥和钬的固态激光器可以直接发射这一波段（约  $1.5\sim 2\ \mu\text{m}$ ）。从固体激光器到光纤激光器发射这一波段激光非常普遍；可以选择 OPO 技术来发射这一波段，也可以选择调谐发射。一般光电对抗系统采用铟和镱离子共同掺杂作为增益介质，其他发射  $2\ \mu\text{m}$  左右激光的可以用铥和钬组合或者双掺杂铥钬的增益介质。

目前，这些激光设备功率较小，只适用于带内干扰技术。发展铥光纤激光器去泵浦钬激光是激光干扰系统的较佳发展途径。

### (4) 中波红外激光器

固体激光很难直接发射这一波段（约  $2\sim 5\ \mu\text{m}$ ）的激光。由于具有非常小的带隙（ $0.6\sim 0.24\ \text{eV}$ ），虽然可以利用增益介质如钬掺杂的氟钇化钡（Ho:BYF）来输出  $2\ \mu\text{m}$  左右的激光，但普遍用一个激光器复合上 OPO 来实现该波段激光的输出。一系列非线性晶体可以用于 OPOs，如 KTP、周期极化的铌酸锂（PPLN）、硒镓银和 ZGP。这些设备可以为脉冲式，也可以为近 CW，非常适合于干扰系统。

采用半导体直接输出这一波段的激光通常有两种方法：一种是光学泵浦的半导体盘状激光器（OPSDLs），发射波段  $2\sim 2.5\ \mu\text{m}$ ；另一种是量子级联激光器，发射波段通常为  $3.8\sim 5\ \mu\text{m}$  和  $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 。这两种激光器都可以工作在室温下，通常的电光转换或者光光转换效率  $\geq 10\%$ ，输出功率通常  $\geq 1\ \text{W}$ ，并且可以选择调制的方式。制成激光器后的光束质量据报道  $M^2 < 2.5$ ，非常适合于远程传感和定向发射。更加吸引人的优势是它们可以非常紧凑坚固，并具有可靠性高的特点。这种激光源的特点开辟了一系列的基于此种中波红外激光设备的应用，如调制激光定向发射，主动传感，自由空间通讯，激光

照明成像，激光遥感（测距）等。图 4<sup>[6]</sup>给出了基于 GaSb 的 OPSDL 的激光器组成布局示意图，它在连续输出时功率为  $1.3\ \text{W}$ ，热沉温度为  $20\ ^\circ\text{C}$ （ $3.4\ \text{W}$ ，热沉温度  $-10\ ^\circ\text{C}$ ），输出波长为  $2.25\ \mu\text{m}$ ，输出圆形光束，光束质量  $M^2 \leq 2.6$ 。

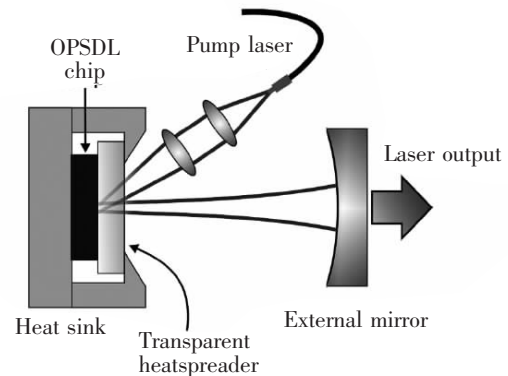


图 4 光学泵浦半导体盘状激光器（OPSDL）的组成布局示意图。它的盘状芯片既是增益介质又是谐振腔后反射镜。

气体激光，如 HF 和 DF 可以直接产生这一波段的激光<sup>[7-8]</sup>，具有宽波段发射的特性。这是由于分子振动态跃迁而产生激光所引起的。其他气体激光如氘化氢和钡蒸汽，也可以提供很多中波红外的输出谱线。另一个技术就是利用  $\text{CO}_2$  激光器的倍频产生  $4.6\ \mu\text{m}$  的激光<sup>[9]</sup>。同时，气体激光可以输出非常高的能量，因此更适合于带外干扰系统。

### (5) 远红外激光器技术

大量固体激光器利用 OPO 技术可以发射远红外波段的激光（约  $8\sim 12\ \mu\text{m}$ ），但这些激光源只是用于非常特定的应用，如化学物质的传感与激光雷达。大量的气体激光器可以直接产生这个波段；最普遍的是用  $\text{CO}_2$ ，也有其他的如氧硫化碳。 $\text{CO}_2$  的同位素也可用于增益介质来扩展发射谱线，这样就可以扩展到  $9\sim 11\ \mu\text{m}$ 。这些都是非常灵活的设备，可以配置用于光电对抗应用；然而，大功率激光系统最大的缺点是需要大口径光学系统，以便把激光束在较远作用距离上进行所谓的“聚焦”，这样，在武器系统的机动性上就具有较大的缺陷。

## 4 激光对抗系统的配置

目前,各种激光器对抗系统的一个巨大挑战是如何在保证激光器输出特性的基础上不断降低开发与生产成本。典型的美国 ABL 计划就是因为预算的巨大开销而被迫终止。典型的激光对抗系统具有一个报警设备(或目标探测系统)、光束定向器和光源。这个系统中最重要的两大部分就是激光光源和光束定向器,其中光束定向器包括 ATP(捕获、跟踪和瞄准)和发射光学系统。

由于光学的捕获视场有限,必须配以目标告警子系统,它的功能就是发现目标。这是一个自动过程,包括探测-捕获-跟踪-识别。许多告警系统具有目标或者威胁评估和在系统控制中心进行“武器”任务执行次序划分的功能。

光束定向器包含了集成到跟踪系统中的光电探测器,它用于传感一个指定的分配目标,以保证“低噪声”的跟踪和提供高分辨率的角度位置。还有一个关键问题就是如何使光束定向器在瞄准目标时,消除平台的运动而保持指向的稳定性。同时,还将发生“指向滞后”的问题,从而降低目标上的能量。当以足够大的瞄准角速度锁定移动的目标时,如果采用简单的(一阶)目标跟踪算法,在这种情况下,当以一个常数的、非零的角速度跟踪目标时,“指向滞后”或者偏离就会发生;如果增加瞄准的角速度,则指向误差增加。因此,更复杂的目标跟踪算法,如二阶算法,将需要集成在跟踪系统中。

完整的激光对抗系统需要以下条件:

- 协调性,就是指向对准;指向告警参考系统和光束定向器之间;
- 光束定向器的跟踪系统光轴和光束系统误差修正或者补偿的协调,这都在瞄准过程中进行;
- 光束定向器的指向稳定性和光束发散角的兼容

## 参考文献

- [1] Titterton D H. A review of the development of optical countermeasures[J]. *SPIE*, 2004, 5615: 1-15.

性,可以保证在锁定过程中光束高概率地打击在指定目标上;

- 平台附近可能锁定区域的地图,以便可以避免“盲(模糊)区”。

图 5 给出了典型的激光对抗中从目标探测到锁定、再到作战损伤评估的完整过程。

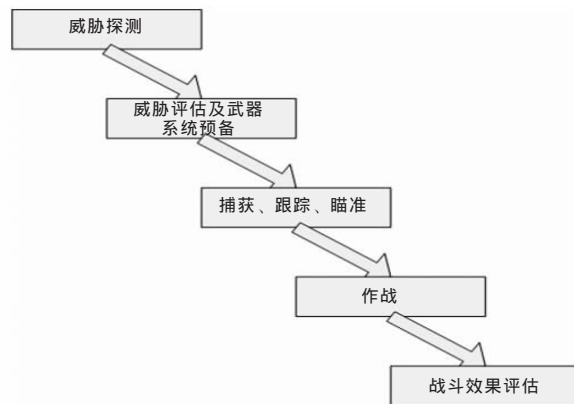


图 5 激光对抗流程

## 5 结 论

光电对抗应用激光器技术的例子不胜枚举,这主要是由于激光器本身具有的一些不可替代的特性可以显著地提高光电对抗的作战效果。目前,激光器技术可以产生从紫外到远红外宽谱段的激光输出,使其应用的范围也不断扩展。现代激光器技术应具有以下特点:

- 紧凑;
- 高效率;
- 坚固可靠;
- 光束形状和配置具有灵活性。

本文基于光电对抗用激光器技术进行了简要介绍,并对其应用于对抗系统中的兼容性进行了分析讨论,由此可以为不同打击机制的激光对抗系统提供总体设计的借鉴与参考。

- [2] 吴建军, 王金玉, 彭佳琦, 等. 激光制导武器转移式光纤干扰参数的参数分析[J]. 应用光学, 2008, 29(1): 86-89.
- [3] 郭劲. 激光定向红外对抗武器系统发展述评[J]. 光机电信息, 1997, 14(2): 23-29.
- [4] 韩超. 红外对抗技术的发展动向与分析[J]. 舰船电子工程, 2009, 29(6): 43-46.
- [5] Goodno G D, Komine H, McNaught S J, et al. Coherent combination of high-power, zigzag slab lasers[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(9): 1247-1249.
- [6] Tholl H D. Mid-infrared semiconductor lasers for power projection and sensing[J]. *SPIE*, 2010, 7836: 78360Q-1-78360Q-12.
- [7] 郭汝海, 施龙, 王思雯, 等. HF/DF 化学激光器的研究进展[J]. 光机电信息, 2010, 27(3): 30-34.
- [8] 郭汝海. 化学氧碘激光器(COIL)的研究进展 [J]. 光机电信息, 2010, 27(5): 22-27.
- [9] Guo R H, Li D J. Experiments of second harmonic generation output in pulsed TEA CO<sub>2</sub> Laser[J]. *SPIE*, 2010, 7843, 78430E-1-78430E-5.

作者简介: 郭汝海 (1976-), 男, 汉族, 博士, 副研究员, 2007年于哈尔滨工业大获得博士学位, 美国光学学会 (OSA) 会员, 主要从事激光器光学设计及光束传输控制等方面的研究。E-mail: hitgrh@163.com

## 《发光学报》

### ——EI核心期刊 (物理学类; 无线电电子学、 电信技术类)

《发光学报》是中国物理学会发光分会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于1980年创刊, 曾于1992年, 1996年, 2000年和2004年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”, 并于2000年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自1999年; 美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自2000年; 美国《剑桥科学文摘社网站》自2002年; 日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自2003年已定期收录检索该刊论文; 2008年被荷兰“Elsevier Bibliographic Databases”确定为源期刊; 2010年被美国“EI”确定为源期刊。2001年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中, 《发光学报》被评为“双效期刊”。2002年获中国科学院2001~2002年度科学出版基金“择重”资助。2004年被选入《中国知识资源总库·中国科技精品库》。本刊内容丰富、信息量大, 主要反映本学科专业领域的科研和技术成就, 及时报道国内外的学术动态, 开展学术讨论和交流, 为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》自2011年改为月刊, A4开本, 144页, 国内外公开发行。国内定价: 40元, 全年480元, 全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用, 踊跃投稿。

地 址: 长春市东南湖大路3888号  
电 话: (0431) 86176862, 84613407  
E-mail: fgxbt@126.com  
国内统一刊号: CN 22-1116/O4  
国内邮发代号: 12-312

邮 编: 130033  
http://www.fgxb.org  
国际标准刊号: ISSN 1000-7032  
国外发行代号: 4863BM