

# 用于目标指示器的激光器研究进展

冯傲<sup>1</sup>, 乐小云<sup>1</sup>, 张小富<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>北京航空航天大学物理科学与核能工程学院, 北京 100191;

<sup>2</sup>中国科学院半导体研究所固态光电信息技术实验室, 北京 100083

**摘要** 激光半主动制导技术极大地提高了导弹命中率, 激光器作为目标指示器的核心器件, 其研究进展对整个激光制导武器系统意义重大。首先介绍了用于目标指示器的激光器的发展历程和研究现状; 然后阐述了当前该激光器的主要技术原理和方案, 分析了其优势和不足; 最后对该激光器的未来发展方向进行了展望。

**关键词** 激光器; 激光二极管抽运固体激光器; 激光半主动制导; 激光目标指示器; 免温控技术

中图分类号 O43

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.010002

## Research Progress on Laser Device Used in Laser Target Designator

Feng Ao<sup>1</sup>, Le Xiaoyun<sup>1</sup>, Zhang Xiaofu<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>School of physics and nuclear energy engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

<sup>2</sup>Laboratory of Solid State Optoelectronic Information Technology, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

**Abstract** Semi-active laser guidance technique greatly improves the hits rate of munitions. The development of laser device, as the core part of laser target designators, is highly significant for the entire weapon system. Development and current status of laser device used for laser target designators is sketched. Current major technical principles and schemes are introduced subsequently, along with the pros and cons of the schemes. Finally, the laser device's future outlook is provided.

**Key words** lasers; diode-pumped laser; semi-active laser guidance; laser target designator; non-temperature-control technique

**OCIS codes** 140.2020; 140.3530; 140.3538

## 1 引言

从 1960 年第一台激光器诞生开始, 人们就开始了激光在军事领域应用的探索。早在 1962 年, 美国就率先开始了此类研究, 并于 1965 年 4 月由德州仪器公司首次完成了激光制导炸弹实验。1968 年全世界第一款激光目标指示器(LTD)完成了战场鉴定。美军于次年装备了包含 LTD 在内的光电吊舱“铺路刀”挂载在 F-4 战机翼下, 配合“宝石路”激光制导炸弹开始了激光制导武器在战场上的大规模应用。这一应用使炸弹命中率提升了约 100 倍, 炮弹对移动目标命中率提升了 2500 倍<sup>[1]</sup>。在轰炸目标时, 这一作战方式不再要求飞机低空投放, 大大降

低了战机的战损率。激光制导武器的成功迅速引起关注并在世界范围内得到应用和发展。

激光制导分为主动成像制导、半主动制导和驾束制导三种方式。其中主动成像制导技术使用的导弹自带激光光源, 导弹通过分析被照亮物体的轮廓自主选择攻击目标。驾束制导技术中激光光束始终指向目标, 导弹依靠尾部传感器的反馈调节飞行轨迹保证自身始终沿光束飞行。这两种技术的实际应用范围都比较窄, 不在本文探讨范围内。半主动制导方式在全世界范围应用最广, 激光器的种类最多, 本文主要讨论这一方向。

激光半主动制导技术的作战方式是在发现目标后, 先用 LTD 本身带有的测距功能或其他测距方

收稿日期: 2018-07-06; 修回日期: 2018-07-14; 录用日期: 2018-07-24

\* E-mail: xfzhang@semi.ac.cn

式确认目标在射程内,然后用 LTD 持续照射,引导激光半主动制导导弹/炸弹摧毁目标。

在这种作战方式下,LTD 中的激光器需要满足一系列技术要求。例如,激光器应有良好的环境适应性,以保证在实际使用时不受恶劣的温度( $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ )和振动条件(作战平台振动谱)影响;此外还要保证小的发散角和高的光束质量。由于历史原因,大多数用于 LTD 的激光器采用基于钕离子增益介质产生的波长  $1.06\text{ }\mu\text{m}$  的激光。另外,激光器的质量、体积、寿命、能量转化效率等参数也在激光器的实用性上占有非常重要的地位,因此以上所有参数在用于 LTD 的激光器发展过程中一直备受关注。

## 2 用于 LTD 的激光器概述

为了满足作战需求,用于 LTD 的激光器应达到的典型光学指标如表 1 所示。出于可靠性的考虑,该激光器一般采用固体工作介质,其基本组成部分包括激光晶体、调 Q 组件、抽运源、冷却系统和谐振腔等。

表 1 典型的用于 LTD 的激光器光学指标

Table 1 Typical optical parameters of laser device

Parameter	Value
Wavelength / $\mu\text{m}$	1.06
Energy per pulse /mJ	40-120
Pulse-to-pulse stability /%	$\pm 5$
Pulse width /ns	$15\pm 5$
Beam divergence /mrad	0.2-0.3
Repetition rate / $\text{s}^{-1}$	20

对于激光晶体,基于钕离子可选的工作介质主要有钕玻璃、Nd:YVO<sub>4</sub>、Nd:GdVO<sub>4</sub>、Nd:YAG 等。从实用角度上,除了工作波长、储能能力、吸收系数和增益系数等光学参数,晶体的硬度、损伤阈值、热导率 and 是否容易在大块晶体中保持均匀的光学质量等因素也非常重要。综合这些因素考虑,Nd:YAG 虽然吸收系数和增益系数稍差,但在储能能力、光学质量,尤其是导热率上的优势决定了它适合生成高峰值功率脉冲<sup>[2]</sup>。因此从早期开始,Nd:YAG 就作为此领域的主流晶体并一直延用至今。

调 Q 组件方面,早期使用的机械调 Q 因稳定性差,很快在 LTD 方向上被淘汰。目前主要有被动调 Q 和主动电光调 Q 两种方法。被动调 Q 一般采用可饱和吸收体 Cr<sup>4+</sup>:YAG,当 Cr<sup>4+</sup>:YAG 的长度、透射率、谐振腔腔长和输出镜透射率等参数确定,激光器光学指标也随之确定<sup>[3]</sup>,其光学系统结构简单,可靠性高。但这种调 Q 方式的激光器缺点是

能量稳定性比较差,只能达到 18%;此外其产生脉冲的时间有一定的随机性,时间不确定度可达  $2.5\text{ }\mu\text{s}$ <sup>[4]</sup>,不适用于对周期精度要求高的平台,仅在早期的激光武器装备中使用。

目前,主动电光调 Q 技术是主流,在铌酸锂(LN)、磷酸钛氧铷(RTP)、磷酸二氢钾(KDP)、磷酸二氘钾(KD\*P)、偏硼酸钡(BBO)和硅酸镓镧(LGS)等电光调 Q 晶体中,RTP 有不潮解、电光系数大和损伤阈值高等优点,但热稳定性差,需要两块匹配使用<sup>[5]</sup>,调节难度大,激光武器装备中很少采用;KDP 和 KD\*P 易潮解<sup>[6]</sup>,必须密封使用,导致插入损耗高<sup>[7]</sup>;BBO 不潮解,损伤阈值高但电光系数低,工作电压高(约为  $5300\text{ V}@1/4\lambda$ )<sup>[7]</sup>,需要两块一起来降低工作电压<sup>[8]</sup>,成本高,调节难度大。LGS 损伤阈值高,不潮解,对温度变化不敏感,但具有旋光性,使电光应用复杂化,实际使用时会出现关门状态下漏光的问题<sup>[8]</sup>。LN 虽然损伤阈值低(约为  $100\text{ MW}/\text{cm}^2$ )<sup>[6]</sup>,但其适用温度范围宽,化学性质稳定,工作电压低( $<3000\text{ V}@1/4\lambda$ ),插入损耗低( $<5\%$ ),制作技术目前最成熟。大多数军用激光武器都采用 LN 电光调 Q 晶体。

抽运源方面,早期激光器采用以脉冲氙灯为主的闪光灯抽运,该抽运源电光效率低,发热量大,需依靠液体冷却,因此系统质量大,目前正逐渐被光电效率更高、谱宽更窄的激光二极管(LD)所取代。

激光晶体、调 Q 晶体等光学件以及谐振腔方案的改善都只在一定程度上提升了激光器的稳定性、环境适应性、光束质量等指标<sup>[9]</sup>。而最受关注的质量问题是因为抽运源的进步才得到改善的。所以一直以来,衡量激光器发展水平的依据主要集中在抽运源上。

## 3 激光器研制进展

### 3.1 闪光灯抽运激光器

早期 LTD 采用的抽运源均为闪光灯且以脉冲氙灯为主。以图 1(a)所示的光路为例,氙灯与激光晶体平行放置,侧面包裹有高反射椭圆柱腔作为聚光腔[图 1(b)],该聚光腔沿光轴方向略长于氙灯发光区,从与光轴垂直的截面上看呈椭圆形,晶体和氙灯分别位于两个焦点处。腔内其余空间充满流动的 70/30 乙二醇/水溶液作为冷却液,发射激光部分重达  $7\text{ kg}$ <sup>[10]</sup>。

氙灯无论发光光谱或者输出能量均对温度不敏感,能在宽温区环境( $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ )稳定工作,故在

当时成为 LTD 抽运源的首选。但对于 Nd:YAG 激光晶体而言,对氙灯的光谱吸收较窄,绝大多数光谱被浪费转化为热,这不但导致 LTD 系统的电光效率较低(约 1%),较高的热负载也使得冷却方案除

了水冷没有其他选择余地,因存在水箱、水泵和冷却液,系统质量较大(5.8~20.86 kg)。另外氙灯的寿命最高仅为  $6 \times 10^6$  个激光脉冲,输出功率在氙灯报废之前就随老化而下降。

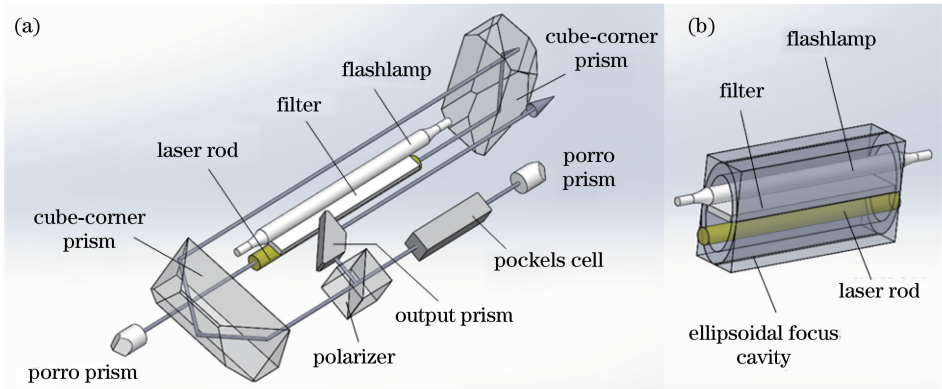


图 1 AN/AVQ-25 激光器(a)光学光路图<sup>[10]</sup>和(b)聚光腔结构

Fig. 1 (a) Beam path diagram of AN/AVQ-25 laser device<sup>[10]</sup> and (b) structure of focus cavity

即便如此,在更先进的抽运源出现之前,美国、法国、英国、澳大利亚、瑞典等研制了应用于飞机、陆地载具、舰船和单兵等多个作战平台共数十个型号的 LTD<sup>[1]</sup>。最初的几种型号虽然装备数量

不大,但仅在越南战场上美军就投放了约 25000 枚激光制导炸弹,平均命中率 60% 以上;在海湾战争中美军投放了 9300 余枚激光制导炸弹,命中率 85% 以上。

表 2 几种主要早期机载光电吊舱

Table 2 Several main kinds of early airborne targeting pods

Podmodel	Developer	Weight /kg	Service time	Platform	Country	Number of equipment
AN/AVQ-10 Pave Knife	USAF	550	1969	F-4	USA	12
AN/AVQ-23 Pave Spike				A-6		
AN/AVQ-26 Pave Tack				F-4	USA, GBR	
		629	1982	F-4	USA, GBR	150
				F111	KOR	

### 3.2 带有温控系统的激光二极管抽运固体激光器

为了解决抽运源发射谱与激光晶体吸收谱不匹配从而导致能量浪费的问题,早在 1963 年就出现了用 LD 抽运激光晶体的实例。由于工艺的限制,早期 LD 阈值电流高,输出功率低,而且在使用时需要冷却至低于 200 K。直到 80 年代后期,得益于半导体物理的发展,可用于常温的、有实用价值的 LD 开始出现,输出功率逐渐提高。到 1992 年,大功率的 LD 实现并用于激光二极管抽运固体激光器(DPL)。

相比于闪光灯,LD 的体积质量都有所降低,寿命也有所延长(约为  $10^8$  脉冲)。最重要的是,LD 谱宽可以低至 10 nm 以下,且可以通过选择输出波长使之与晶体吸收谱匹配,能量转化效率可得到大幅提升,从而使系统热负载大大降低,为传导冷却方案

带来可能。因此 DPL 相比于灯泵激光器有体积小、寿命长、效率高和光束质量好等优点。由于没有水冷系统,其体积、质量都得到优化,整个系统的寿命和稳定性得到提高,在各种目标指示器中逐渐取代了灯泵激光器。

LD 带来众多好处的同时,也带来了温控问题。由于温度的变化会改变其输出波长(约为  $0.28 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ),为了维持激光晶体对抽运光吸收的稳定性,需要用类似图 2 结构的温控系统对 LD 进行精确控温:当温度低于预定温度点时,需要用电阻加热;反之需要用半导体致冷器(TEC)制冷。这带来的问题在于,系统刚刚启动时,如果环境温度不在预设温度点上,需要花费约 2 min 的时间预热,失去了之前灯泵激光器可以即开即用的特性,这在某些军



用场合是不容易被接受的。另一方面,高温下 TEC 制冷效率通常在 70% 以下,温控系统散出的热量大于 LD 工作产生的热量,加剧了散热能力有限的整个光电系统的热负载,而且容易造成越难散热就越要产生热的恶性循环。即使是在非极端条件下使用时,为了维持 LD 的温度,温控系统要持续工作,存在一定

的待机功耗。这在便携应用的场合,如单兵携带的地面激光照射器,就会暴露出电池续航的问题。最后,虽然质量更轻的风冷精确温控系统取代了水冷散热系统,但在复杂程度或故障风险方面并没有改善,TEC、温度传感器的失效或性能下降都会导致温控系统精度下降、响应延时,造成激光输出不稳定。

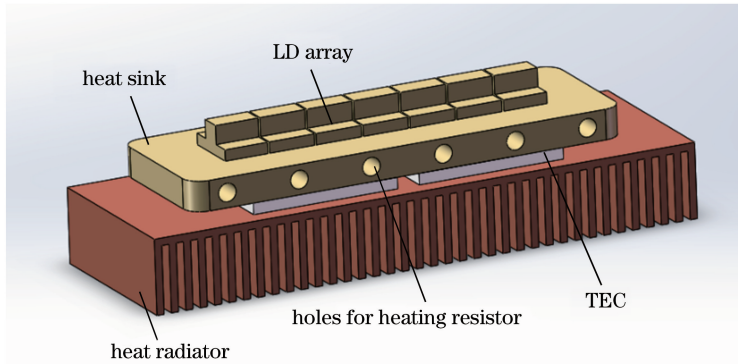


图 2 LD 阵列及温控模块示意图

Fig. 2 Structure of LD array and temperature control module

总体来说,带有精确温控系统的 DPL 虽然质量和寿命都比灯泵激光器有所改善,但需要温控、存在待机功耗和预热时间等缺点阻碍了 LD 抽运源优势的发挥。

美国自 1997 年开始研究半导体抽运的制导用指示激光器,并于 2002 年随 AN/ASQ-228-ATFLIR 吊舱开始装备于美国海军 F-18 战斗机上<sup>[11]</sup>。该型号吊舱与同期的 AN/AAS-28(V)-LITENING 系列吊舱是最成功的产品。截至 2012 年,这两款吊舱至少共有 1416 套装备在约 30 个国家几乎各种型号的军用飞机上。

### 3.3 免温控 DPL

为了在激光器更轻、更可靠、寿命更长的基础上解决因 LD 需要温控带来的新问题,当前 DPL 发展的关注点在于免温控和即开即用。在实现途径上主要分为两种:1)任由 LD 输出波长随温度变化,虽然抽运源提供的波长不稳定但可以采取措施保证晶体所获得的增益对波长不敏感从而实现温度脱敏;2)直接让 LD 输出的波长不随温度变化,使抽运光本身对温度脱敏。

#### 3.3.1 晶体增益对温度脱敏方案

##### 3.3.1.1 多波长抽运

使晶体在一个温度区间内增益保持稳定的方案之一是多波长抽运技术。多波长抽运主要针对光纤应用于通信领域,目的是在波分复用时,为光纤中传播的多种波长信号光提供一致的增益。在 DPL 方

向上,武汉军械士官学校光电技术研究所程勇团队于 2016 年提出该方案并提供了波长选择和功率分配方法<sup>[12]</sup>。

其思路是将不同中心波长的 LD 封装成抽运模块。以三波长抽运方案为例(图 3),虽然每一种 LD 的输出波长都随温度变化,但如果选择得当,在任一温度下,这三个波长中至少有一个与激光晶体吸收谱匹配良好,得到较高的吸收系数,其他匹配程度较差的一至两个波长起辅助作用。当温度变化时,三个波长同时漂移,原来与吸收谱匹配较好的波长虽然漂出了最佳区域,但另外两个波长漂进了高吸收率区域。因此三个波长在随温度漂移过程中,互相弥补。如果再配合以功率分配措施,从整体效果来看,可以将吸收率维持在某一个范围内,免去激光器的温控系统。

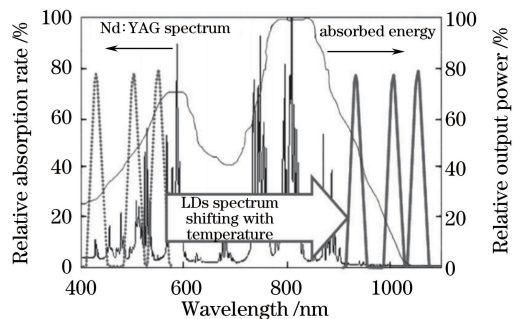


图 3 多波长 LD 与 Nd:YAG 吸收谱匹配示意图<sup>[12]</sup>

Fig. 3 Accouplement of multi-wave LD and Nd:YAG absorption spectrum<sup>[12]</sup>



多波长抽运方案的优点是成本低,易实现。只要计算出合适的波长组合,就可以将三种 bar 条封装成一个抽运模块。但这种方案也有缺点:1)在空间有限的情况下,LD bar 条的数目是有限的。抽运光谱由单一波长变成三波长后,每个波长对应 bar 条数目也减少为原来的 1/3。假设某一温度下只有一个波长与吸收谱匹配,那么激光晶体所获得的抽运功率也减少至 1/3。不但降低了电光效率,而且多余的热量还为热管理增加了难度,使激光器在散热和光束质量方面承受更大的压力。2)为了保证整体吸收效率的稳定,三个波长的选择和各自功率控制都需要精心设计。即使如此,能保证输出能量稳定性的温区宽度也无法任意控制。实际上,经过编程计算得出波长选择结果和功率分配策略,最佳结果为 25 °C 下 802.35,813.15,810.95 nm 三个波长以 1:0.6:1 的功率比抽运  $\text{Nd}^{3+}$  掺杂原子数分数为 0.65%、长为 50 mm 的晶体,可以在 81.4 °C 范围内保证能量吸收率波动小于 5%<sup>[12]</sup>。3)不同的抽运波长,其无辐射跃迁对应的能级宽度是不一样的,导致晶体的热效应和热透镜焦距变化,相当于激光器的参数在一直变化,不同温度下其输出的激光模式、光束质量和其他光学参数均不稳定。

基于此方案,美国诺格公司第三代陆用激光目标指示器(GLTD III)(图 5)可以在 -32~49 °C 范围内保持能量 80 mJ 以上、稳定性优于 15% 的激光输出,且激光器没有主动冷却系统,可以实现静音运行。

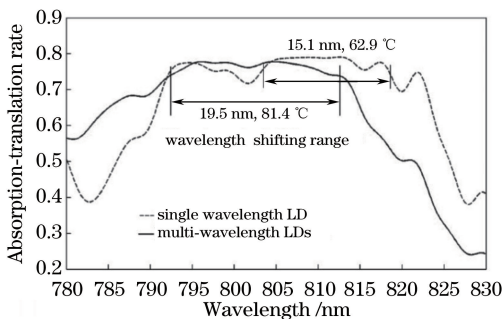


图 4 50 mm 长、原子数分数 0.65%  $\text{Nd}^{3+}$  晶体对单波长和三波长抽运光吸收效率曲线对比

Fig. 4 Curves of absorb-translation rate of single and three wavelength pumps in  $\text{Nd}^{3+}$  doped crystal with an atom percent of 0.65 and length of 50 mm

### 3.3.1.2 长光程抽运

激光晶体的吸收谱是在某一长度下测量的,对应的光程越小,不同波长间吸收系统的差异越明显。而当光程长到一定程度时,即使是低吸收系数波长



图 5 采用多波长抽运方案的免温控单兵用激光目标 LTD  
Fig. 5 Individual non-temperature-control laser designator under multi-wave pumping scheme

的抽运光也会被吸收大部分,此时吸收谱也就变得相对平滑。

为了实现长光程抽运,CILAS 公司报道了如图 6(a)所示的抽运结构<sup>[13]</sup>:两块 YAG 晶体通过扩散接合工艺<sup>[14]</sup>将一 Nd:YAG 板条夹在中间。末端的两个突起是 LD 模块,与之对应的面镀有增透膜,其余的侧面镀有高反膜。抽运光进入晶体块之后因其特殊的形状得以在两个高反面间多次往返穿越晶体,对应着比较长的光程,最终使晶体对不同波长抽运光较为平滑的吸收[图 6(b)]。

该方案的优势在于不需要额外的器件,甚至在省掉了抽运源与激光晶体之间的耦合器件的情况下就能实现很高的利用率,因此很容易实现小型化。

基于此方案,AIRTRAC 公司推出了结构极其紧凑的激光器(图 7)。该款激光器可以在 -40~60 °C 范围内实现能量不小于 70 mJ 的稳定输出。

该方案除了在某些温度可能需要补偿电流以保证能量稳定性之外,几乎是完美的。只是其中使用的扩散接合工艺要求太高,接合表面上任何一点污染或划痕都会导致接合失败<sup>[15]</sup>。本方案中同一块晶体的两个表面都要接合,面积大、成品率低。

### 3.3.2 抽运源对温度脱敏方案

实现 DPL 免温控的另一个方案是直接锁定 LD 的输出波长。LD 工作温度和电流发生变化导致输出波长发生变化,其原因是半导体禁带宽度发生了变化,反转粒子在此时的分布导致在没有人干预的情况下最容易起振的波长发生变化。这并不代表与目标波长相对应的能带上没有反转粒子分布,只是这部分能量被最先起振的波长提取出去了。因此若能人为地为谐振腔提供反馈,在振荡还没开始的荧光阶段将目标波长的光子反射回去实现选模,那么此纵模便能在竞争中得胜起振,将能量提取出去,最终实现 LD 输出波长的锁定。

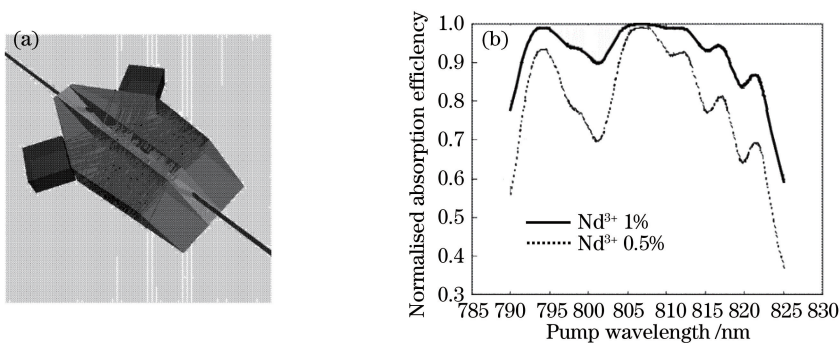


图 6 (a)长光程抽运方案示意图及(b)在两种掺杂  $\text{Nd}^{3+}$  原子数分数(0.5%, 1%)晶体中抽运光吸收谱

Fig. 6 (a) Scheme of long optical path pump and (b) absorption spectrum of  $\text{Nd}^{3+}$  doped crystal with different atom percents (0.5%, 1%)



图 7 长光程抽运方案免温控激光器

Fig. 7 Non-temperature-control laser device under long optical path pumping scheme

在这个过程中最关键的器件是体布拉格体光栅 (VBG),其作用类似激光器谐振腔内的输出镜。但常规部分反射镜的反射谱宽约 10 nm 以上,在这个范围内变化的波长足以使激光晶体的吸收率发生变化。而 VBG 对波长的敏感范围是 1 nm 以下,从而将晶体吸收系数的变化控制在可接受范围内。

VBG 在原理上是一种沿着光轴方向折射率呈周期性突变的器件(图 8),在光线传播的路径上,每一次入射至突变区表面都会被返回一部分,如果各个突变层间距设置合理,它们所返回的光就会形成相长干涉,起到部分反射镜的作用。通过控制层数控制反射率,就可以形成一个反射率可选的、有着强纵模选择能力的输出镜。制成产品的 VBG 热稳定性和长时稳定性优良,只要不暴露在强紫外辐射下,VBG 都能保持响应波长变化率小于 0.01 nm/°C。因此如果将 VBG 与本身没有输出镜的 LD 配合使用,在 LD 外腔为之提供反馈,可以在一定温度范围内锁住输出波长,并且整个模块的寿命仍取决于 LD,达到  $10^8$  脉冲的量级,如图 9 所示。

VBG 内部的折射率突变层通常需要在 1~2 mm 内达到上千层<sup>[17]</sup>,其制作难度很大。但得益于紫外光刻技术的发展,可以用 He-Cd 激光器为例的 325 nm 激光器产生全息干涉条纹照射紫外光

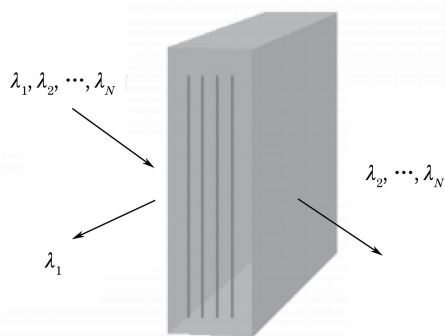
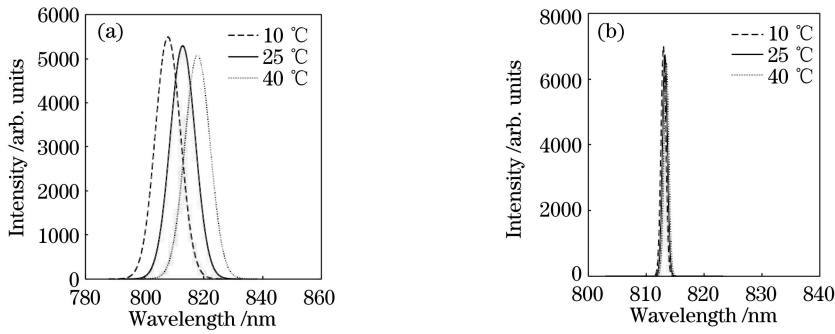
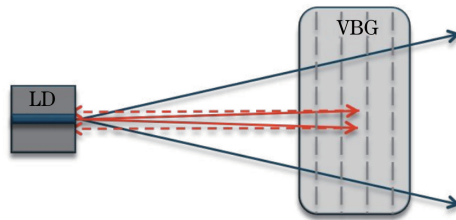


图 8 VBG 多折射率层结构<sup>[16]</sup>

Fig. 8 Structure of multi-layer VBG<sup>[16]</sup>

敏材料(如  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  晶体),干涉条纹中的亮条纹使曝光区折射率发生变化,形成突变层。在实际应用中,VBG 与 LD 光轴垂直放置如图 10 所示。由布拉格条件可知,VBG 光线的入射角度也很敏感,只有约  $\pm 2.5^\circ$  的接收角。所以 VBG 平面一方面要尽量于 LD 光轴垂直,另一方面要对 LD 的快轴方向用柱面镜做准直,使尽可能多的光线出现在可接受的角度内,从而保证被反射回来的能量能重新回到 LD 中。

VBG 锁波长的方式虽然有效,但其所对应的温度范围有限。比如在 25°C 下 LD 荧光谱以 808 nm 为中心,谱宽为 10 nm。若按 0.28 nm/°C 的漂移速率,在  $\pm 17.9^\circ\text{C}$  范围内,荧光谱都包含 808 nm。若 VBG 反馈波长是 808 nm,那么在  $(25 \pm 17.9)^\circ\text{C}$  范围内均能为 LD 提供反馈。当温度超出这一范围时,目标波长对应的荧光太弱,导致反馈不足,不能起振。但如果下一个 35°C 对应的 LD 荧光波长范围内,激光晶体也有吸收系数相近的吸收峰,则可以在多块 VBG 上写入另一套干涉条纹来响应这个波长。而两套条纹对对方波长没有响应,所以可以没有干扰地拓宽工作温度范围。但要注意的是,若温度在变化时恰巧跨越这两个温度段,则抽运波长

图9 VBG锁波长前后LD输出光谱的对比<sup>[18]</sup>Fig. 9 Output spectrum before and after wavelength locked by VBG<sup>[18]</sup>图10 VBG外腔反馈示意图<sup>[18]</sup>Fig. 10 Setup of VBG external cavity feedback<sup>[18]</sup>

会发生跳变,此时如果激光晶体的吸收系数差异太大,会引起DPL输出能量的跳变。所以在设计阶段选择各温度段的工作波长时,应依据晶体吸收谱仔细考虑吸收系数的匹配问题。

基于这个方案,Moser等<sup>[19]</sup>报道了锁波长抽运源的进展;Mccarthy等<sup>[20]</sup>报道了100℃范围免温控40 mJ激光器;北京航空航天大学乐小云、中国科学院半导体所张小富项目组实现了一40~60℃温度区间内80 mJ的稳定输出,能量稳定性约为2%,单机质量小于2.5 kg。

从项目实践情况看,该方案达到了对温度脱敏、即开即用的目标,而且系统质量、复杂度和能量稳定性都得到了相应的改善。该方案不需温控并不代表不用散热,进入实用阶段后,在解决LD高温下功率衰减的问题前仍需为LD提供良好的散热措施,甚至在有些高温应用场合提供主动制冷措施,但是此时的制冷不需要精细控制,只要使LD处于较低的温度就可以了。

### 3.4 脉冲半导体激光器

除了常规激光器在持续发展,还有一个新的发展方向,由于近年来小型无人机的迅速崛起,其灵活性的响应速度都优于传统的有人载具和单兵,因此出现了越来越多适合小型无人机使用的LTD。但小型无人机电载能力低,只能使用较轻的设备,不过由于它体积小,可以接受更近的接敌距离(1~

3 km),所以也可以接受更低的激光能量输出。结合这种应用场景及其应用范围扩大的趋势,激光器的发展方向可确定为质量以百克计、体积小、输出能量低,目标指示距离不超过3 km,采用脉冲半导体激光器直接照射目标的微型LTD。

目前可查的产品是瑞士SAFRAN公司的激光测距机(图11),质量仅120 g,对人体目标测距的有效距离不低于1400 m;对坦克大小目标测距的有效距离不低于2500 m。这种测距机为微型LTD的发展提供了研究方向。

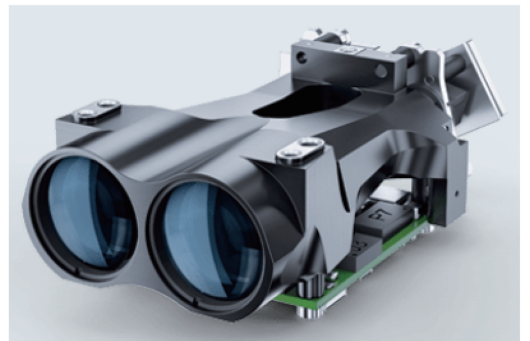


图11 瑞士SAFRAN公司脉冲半导体激光器测距机

Fig. 11 Pulsed diode laser rangefinder by SAFRAN Inc, Switzerland

### 3.5 目前LTD产品的典型指标

目前,各抽运方案下LTD产品的典型指标如表3所示。



表3 各抽运方案下LTD产品的典型指标

Table 3 Typical indexes of LTD products hitherto under each pumping scheme

Pump scheme	Flashlamp	LD (temperature control)	LD (multi-wave)	LD (wavelength locking)	LD (long optical path)
Wavelength /nm	1064	1064	1064	1064	1064
Power@20 Hz /mJ	80±8%	80±2%	80±15%	80±8%	70
Angle /mrad	0.3	0.2	0.3	0.2	0.25
Operating temperature /℃	-40-60	-40-60	-32-49	-40-60	-40-60
Power consumption /W	Laser: about 130 Water pump: about 40 Laser & Power module: about 3	Laser: about 30 Temperature control: <150	Laser: 30-50	Laser: about 50	Laser: <25
System component /kg	Water cooling system: about 2.6	(including range finder module): about 1.6	Laser module Power module: about 0.9		Laser module+ Power module<0.7
Pumping wavelength shift / (nm·℃ <sup>-1</sup> )	Broad band	0	0.28	0.01	0.28
Major defect	Low energy transformation ratio & high weight	Warm up time & stand-by power consumption	Low energy stability & narrow temperature range	Complex process & high cost	Complex craft & low yield

## 4 结 论

用于目标指示器的激光器未来发展方向有两个:1) 基于免温控技术的DPL,该技术可以用于作用距离较远的武装直升机和察打一体无人机等平台;2) 脉冲半导体激光器,该技术功耗低、体积小、作用距离短,可用于微型无人机平台。不管采用哪种方式,目前常规LD已有高温型产品<sup>[21]</sup>,但新型用于锁波长的半导体激光器在高温条件下(>55℃)的输出呈非线性衰减,因此需要可高温工作的半导体激光器。

从长期来看,所有问题的核心都是热管理问题,所以激光器会向高电光效率,低发热功率<sup>[22-23]</sup>方向发展。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang C Q. Foreign military laser instrument manual [M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 1989: 226-228.  
张承铨. 国外军用激光仪器手册[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1989: 226-228.
- [2] Liu J, Yang J M, He J L. Comparison of diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub>, Nd:GdVO<sub>4</sub> and Nd:YAG lasers' characteristic[J]. Laser Journal, 2003, 24(5): 28-

30.

刘杰, 杨济民, 何京良. LD抽运Nd:YVO<sub>4</sub>, Nd:GdVO<sub>4</sub>和Nd:YAG激光特性比较[J]. 激光杂志, 2003, 24(5): 28-30.

- [3] Degnan J J. Optimization of passively Q-switched lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1995, 31(11): 1890-1901.
- [4] Nie J S, Ning Y G. Study on the time delay of passive Q-switch laser[J]. Laser Journal, 2006, 27(1): 11, 13.  
聂劲松, 宁永刚. 被动调Q激光器的时间延迟特性研究[J]. 激光杂志, 2006, 27(1): 11, 13.
- [5] Roth M, Angert N, Tseitlin M. Potassium titanyl phosphate (KTP)-an oxide of choice for nonlinear optical and electro-optic devices[C] // Proceedings of 2nd Israeli-Russian Binational Workshop, 2003: 223-235.
- [6] Tian ZB, Zhang S J. Electro-optic Q switch of an La<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>SiO<sub>14</sub> crystal[J]. Applied Optics, 2006, 45(10): 2325-2330.
- [7] Dong L. Study of characteristics of RTP Q-switching laser device[D]. Jinan: Shandong University, 2007: 6.  
董磊. 磷酸钛氧铷电光调Q激光器的特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2007: 6.
- [8] Wang J Y, Guo Y H, Li J, et al. Progress in

- electro-optic crystal research [J]. *Materials China*, 2010, 29(10): 49-58.
- 王继扬, 郭永解, 李静, 等. 电光晶体研究进展 [J]. *中国材料进展*, 2010, 29(10): 49-58.
- [9] Daly J G. The Nd:YAG laser rangefinder/designator [J]. *Proceedings of SPIE*, 1986, 0610: 68-71.
- [10] Crow T G, Murtha J E, Ticen J, *et al.* AN/AVQ-25 laser rangefinder-target designator (LR/TD)-design and support considerations[C]//*Electro-Optics/Laser Conference and Exposition*, 1978: 305-312.
- [11] Nieuwsma D E, Wang J. Design of an advanced diode-pumped solid state laser for high-altitude airborne operations[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5659:163-170.
- [12] Liu X, Wei J S, Tan C Y, *et al.* Theoretical analysis of multi-wavelength temperature-free-control pump source of laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 0505004.
- 刘旭, 魏靖松, 谭朝勇, 等. 激光器免温控泵浦源的多波长选择理论 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(5): 0505004.
- [13] Crépy B, Le Nevé M, Montagne J, *et al.* Efficient, diode temperature insensitive Nd : YAG hybrid longitudinal/transversal-pumped zig-zag slab laser: delta concept [C] // *Advanced Solid-State Lasers*, Québec City, Canada, 2002.
- [14] Crepy B, Closse G, Cruz J D, *et al.* Athermal diode-pumped laser designator modules for targeting application[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8541: 85410R.
- [15] Chen D Y, Li X D, Zhang Y, *et al.* Research on diffusion-bonding composite  $YVO_4/Nd : GdVO_4$  crystal[J]. *Laser Physics Letters*, 2011, 8(1): 46-49.
- [16] Wang HB, Yang D X, Zhao J L, *et al.* Fabrication method of multiple VBGs with directly layered structure and its experimental demonstration [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6149: 614910.
- [17] Maki J J, Campbell N S, Grande C M, *et al.* Stabilized diode-laser system with grating feedback and frequency-offset locking [J]. *Optics Communications*, 1993, 102(3/4): 251-256.
- [18] Fritsche H, Koch R, Krusche B, *et al.* Generating a high brightness multi-kilowatt laser by dense spectral combination of VBG stabilized single emitter laser diodes [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9134: 91340U.
- [19] Moser C, Havermeier F. Compact self-aligned external cavity lasers using volume gratings [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7194: 71940F.
- [20] McCarthy J C, Young Y E, Day R C, *et al.* Athermal, lightweight, diode-pumped, 1-micron transmitter[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5707: 237-242.
- [21] Liu X, Cheng Y, Wan Q, *et al.* High temperature laser diode pumped all-solid-state laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(7): 0701003.
- 刘旭, 程勇, 万强, 等. 高温激光二极管抽运全固态激光器 [J]. *中国激光*, 2016, 43(7): 0701003.
- [22] Sheik-Bahae M, Epstein R I. Optical refrigeration [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(12): 693-699.
- [23] Muys P. The athermal laser [J]. *Physics*, 2009.