

文章编号:1001-5078(2004)03-0165-04

适用于弹道导弹激光引信的 DPSSL 研究

张翼飞¹,邓方林¹,陈卫标²

(1. 第二炮兵工程学院自动控制系,陕西 西安 710025;2. 中国科学院上海光学精密机械研究所,上海 201800)

摘 要:设计了一种激光二极管泵浦全固体激光器方案,采用 NdYVO₄ 或 YbYAG 作为工作介质,端面泵浦,Cr⁴⁺YAG 被动调 Q,三明治形式构造。所设计的激光器具有体积小、重量轻、高重频、高峰值功率、坚固耐用等优点,适合在弹道导弹激光引信系统中作为激光发射器应用。

关键词:弹道导弹;激光引信;二极管泵浦全固体激光器;被动调 Q;高重频

中图分类号: TJ43⁺9.1

文献标识码: A

Study on DPSSL Fitting for Ballistic Missile's Laser Fuze

ZHANG Yi-fei¹, DENG Fang-lin¹, CHENG Wei-biao²

(1. Department of Automation, The Second Artillery Engineering Academy, Xi'an 710025, China

2. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS, Shanghai 201800, China)

Abstract: A scheme of diode-pumped solid-state laser is designed using NdYVO₄ or YbYAG as working medium, Cr⁴⁺YAG as passively Q-switch and sandwich structure. The laser has many advantages, including small size and weight, high repetition rate and peak power, firmness, etc. So the laser is fit for ballistic missile's laser fuze.

Key words: ballistic missile; laser fuze; diode-pumped solid-state laser (DPSSL); passively Q-switched; high repetition rate

1 引 言

引信是导弹武器系统的重要组成部分,它是通过感觉目标或按预定条件控制弹药爆炸序列适时引爆的系统,其性能优劣直接影响到导弹对目标的杀伤效果。常用的引信形式有无线电引信、惯性引信和激光引信等,相对于无线电引信和惯性引信而言,激光引信既有抗电磁干扰能力强的特点,又可以达到很高的测距精度,因而近年来在航空炸弹、火箭、飞航导弹或反坦克导弹上得到了大量应用。根据有关资料统计,目前有 80%~90% 的空空导弹配备了激光引信,国外反坦克导弹所使用引信的主要型号也几乎是清一色的激光引信^[1]。但由于技术实现上还存在一些难题,迄今为止,激光引信还未在弹道导弹上得到真正成功的应用。与飞航导弹、航空炸弹不同,弹道导弹面临的作战环境极为复杂,战术使用要求高,并要受到弹头自旋、重量、体积等条件限制,

因而对其引信系统提出了很高的指标要求,必须采用新技术、新方法才能研制出适合在弹道导弹上应用的激光引信。激光器是激光引信的核心部件,适合于弹道导弹的激光引信能否研制成功在很大程度上取决于激光器设计的先进性与合理性。本文介绍了一种能够满足弹道导弹激光引信使用要求的二极管泵浦的全固体激光器设计方案,从工作介质的选取、泵浦源、调 Q 方式、激光器结构及电源等方面对该激光器进行了详细研究。

2 弹道导弹激光引信构成及特点

2.1 激光引信构成

弹道导弹激光引信的主要作用就是测定距目标

基金项目:本课题为第二炮兵预研项目 (EP990091)

作者简介:张翼飞(1976-),男,西安第二炮兵工程学院博士研究生,现研究方向为导弹战斗部引信系统分析与设计。

收稿日期:2003-11-06

地面的高度,控制战斗部在预先装定的最佳高度上引爆并摧毁目标,从而达到对目标的最佳杀伤效果。引信采用脉冲法测距,其原理是利用脉冲激光器对目标发射一个或一系列很窄的光脉冲,测量光脉冲到达目标并由目标返回到接收机的时间,由此计算出距目标的高度。

导弹上的激光引信原理方框图如图 1 所示。通常激光引信由以下几个部分组成:电源、激光器、发射光学系统、接收光学系统、探测器和脉冲放大器、信号处理和判决电路、执行电路、安全与解除保险机构、引信爆炸序列等。其中由发射系统、接收系统、光学系统和信息处理系统等部分构成的测距系统是激光引信的主体,而激光器又是激光测距系统的核心,可谓是整个激光引信系统的重中之重^[2]。

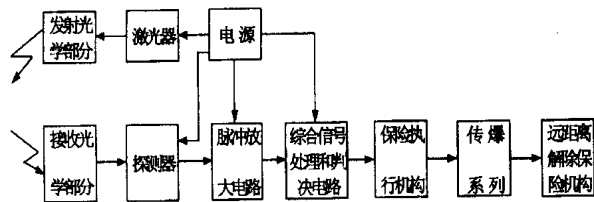


图 1 导弹激光引信原理方框图

2.2 弹道导弹激光引信特点

弹道导弹激光引信的主要特点如下^[2]:

1. 重复频率高。普通激光测距系统发射脉冲的重复频率一般只有几赫兹或几十赫兹,但应用在弹道导弹引信上的激光测距系统的脉冲重复频率要求要高得多。这是由于脉冲测距法测量的高度值是不连续的,而弹头攻击目标时速度非常快,可达每秒一至数公里,若重复频率太低,则测量的高度间隔太大,可能错过最佳的爆高高度,达不到应有的战术效果。为保证较高的爆高精度,引信工作的重复频率至少应大于 1k Hz,这样可保证引信的测高精度达到米级。

2. 体积小、重量轻。由于弹头的空间有限,激光器的体积不能太大;激光器的重量也不能过重,否则将会加大弹头重量,减小导弹的有效射程。因此一些体积和重量较大的激光测距系统将无法在导弹上应用。

3. 适应较高的环境温度。弹头再入时与大气剧烈摩擦,导致温度迅速升高,即使激光器安置在弹头内部,通过隔热材料和隔热材料保护可对温度的变化加以阻隔,但还是要有一定的耐高温能力。

4. 测程远。为确保杀伤效果,弹道导弹战斗部的爆炸高度一般较高,某些子母弹弹头的解爆抛撒高度甚至可高达 4.5 公里。而一般飞航导弹上应用

的激光引信的作用距离仅为几百米,故弹道导弹激光引信的下视测程要相对远得多。经理论和仿真计算,若要使激光引信的测高高度达到 5km,则脉冲激光器的峰值功率至少应在 200kW 以上。

由于弹道导弹的激光引信具有这样一些特殊性质,普通激光器是难以满足其要求的,必须根据其特点采用新方法设计更为先进合理的激光器。

3 二极管泵浦全固体激光器设计

目前常见的激光引信基本上采用的都是激光二极管激光器,激光二极管具有体积小、重量轻、功耗小等优点,在小型飞航导弹或航空炸弹的激光引信系统中得到了广泛应用;但一般激光二极管的峰值功率仅在百瓦级,并且光斑质量较差,很难整形,因此作用距离只限于 1 km 以内,无法满足弹道导弹远测程的要求。气体激光器尽管具有功率大、光束质量高、束散角小、穿烟雾能力强等优点,但由于其体积、重量较大,因而存在着不利于做成小尺寸大能量的脉冲激光器的致命缺陷,使其难以在导弹武器系统上得到应用。综合考虑后只有固体激光器具有能量大、峰值功率高、结构紧凑、牢固耐用等优点,因而最适宜用作弹道导弹激光引信系统的激光发射器。

DPSSL 技术是近年来激光技术研究领域中的一个热点,它具有体积小、重量轻、结构紧凑、全固体、效率高、寿命长、发热密度小等优点,这些对提高固体激光器的输出功率和效率、改善光束质量是非常有利的,更重要的是采用二极管泵浦的固体激光器,辅以先进的调 Q 技术,能够实现高重频脉冲输出,其重频可以达到几千赫甚至几十千赫。目前,DPSSL 的关键技术已被解决,正在从实验研究向实用研究迈进,并有望在本项目得到成功应用。

为了设计出满足性能要求的激光器,应对激光器的稳定性、光束质量、泵浦效率给予充分重视,并力求最佳化,即要求对工作介质、泵浦方式、调 Q 开关、激光器整体结构和电源等根据应用和性能要求进行优选和设计。

3.1 工作介质选取

目前,适合激光二极管泵浦的工作介质有很多种。其中,NdYAG、NdYLF、NdYVO₄ 是较成熟的介质,而 YbYAG 和 YbKYWO₄ 由于其高荧光寿命和宽吸收带宽,近些年来也备受关注。

NdYAG 激光器是目前使用最广泛的固体激光器,NdYAG 晶体的工作波长在 25 °C 时为 1.064μm,美国多次航天试验均采用激光二极管泵浦的 NdYAG 激光器,说明这种材料可以满足航天要求。但 NdYAG

也有不足之处,其主要缺陷就在于吸收带宽过窄,只有2nm。当采用激光二极管进行泵浦时,由于二极管对温度的变化非常敏感,温度稍有升高,频带就会漂移,从而影响到NdYAG晶体的吸收效率。因此必须对激光二极管进行严格的温度控制,才能达到较高的输出效率。而温度控制则需要增加弹上功耗和热稳定时间,另外由于弹头的体积和重量都有严格限制,因此难以安装大体积、大功率的温控装置。

鉴于上述原因,拟采用NdYVO₄或者YbYAG作为工作介质代替NdYAG,两种介质都具有宽的吸收带宽,因此无需对激光二极管进行严格的温度控制。NdYVO₄具有低的泵浦阈值,而YbYAG则具有好的温度特性和高的荧光寿命^[3]。图2为NdYVO₄介质的吸收光谱曲线,可以看出,其吸收带宽接近10nm,因此对环境温度的变化具有较好的适应性。在实际器件研制过程中,将从体积、功耗两个方面进行筛选,确定最终选用何种介质的激光器。

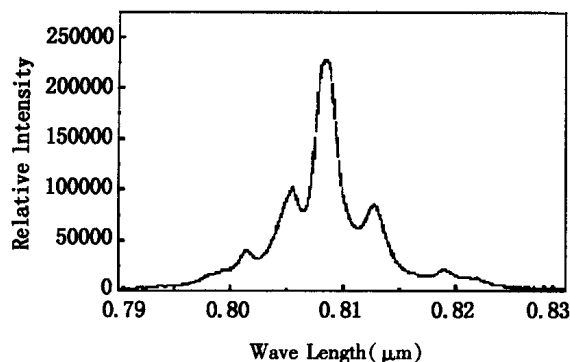


图2 NdYVO₄的吸收光谱特性

3.2 泵浦方式

近几年随着MOCVD工艺和量子阱器件结构的问世以及高功率、高效率激光二极管的迅速发展,激光二极管泵浦固体激光技术亦获得相应的发展。与灯泵浦相比,激光二极管泵浦的激光器模匹配有效,泵浦密度高,因而其体积小、重量轻、结构紧凑、全固体、效率高、寿命长。而且,二极管泵浦的激光器发热密度小,在相同输出功率水平下,其热沉积仅为用闪光灯泵浦时的五分之一左右。这些对提高激光器的输出功率和效率、改善光束质量是非常有利的。二极管泵浦的固体激光器的总体效率可达到7%~20%,远远高于灯泵浦的固体激光器。二极管泵浦固体激光器的另一突出优点是体积小,半导体激光器本身尺寸很小,其供电电源也很小,只是放电电源体积的几十分之一,这为固体激光器小型化创造了良好的条件^[4]。正是由于二极管泵浦的固体激光器具有这些优点,使其非常适合于在弹道导弹激光

引信系统中应用。

端面泵浦和侧面泵浦是DPSSL通常采用的两种泵浦方式。侧面泵浦可以得到大能量、高平均功率的激光输出,但泵浦的均匀性、输出激光的模式都明显不如端面泵浦的好。两端面泵浦尽管系统构造较复杂,但却具有效率高、模式好、工作物质的冷却结构比较简单且几乎不影响泵浦效率的优点。另外,采用端面泵浦耦合方式时,激光晶体所需长度很短,与厚度薄的Cr⁴⁺YAG晶体Q开关结合,可获得很短的激光器腔长,所以相对侧面泵浦而言,它能得到更短的调Q脉冲宽度和较小的激光器体积^[5],因而更适合在本方案中应用。

3.3 调Q方式

调Q技术的特点是将激光能量压缩在很短的时间($10^{-7} \sim 10^{-9}$ s)内发射,从而极大地提高激光脉冲的亮度和功率。近年来,由于掺四价铬的各种晶体具有较宽的荧光谱(1.1~1.58μm),因而既可用做激光晶体,又可作为饱和吸收元件,受到普遍关注。Cr⁴⁺YAG具有饱和光强小、导热性好、化学性质稳定、损伤阈值高等特点,而且在1.06μm处具有较高的吸收截面,因而同NdYVO₄、YbYAG等晶体配合很容易做成体积小、价格便宜的脉冲激光器^[6],因而本方案中采用了这种利用Cr⁴⁺YAG进行被动调Q的方式。

3.4 激光器整体结构

在设计激光器的整体结构时,为了缩小体积、增加可靠性,拟采用先进的三明治形式构造的激光器,其结构图如图3所示。

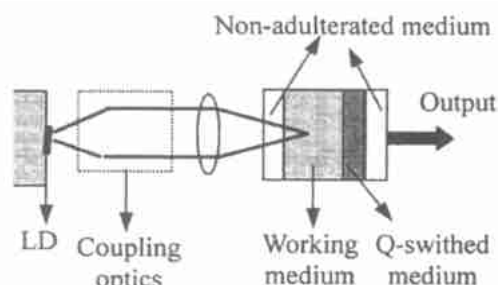


图3 半导体激光端面泵浦、被动调Q激光器示意图

工作介质采用NdYVO₄或YbYAG晶体,并采用Cr⁴⁺YAG晶体进行被动调Q,工作介质和调Q晶体之间可以采用光胶方式连接,以减小体积。泵浦源采用光纤输出的808nm半导体激光器,输出功率为10W左右,通过端面直接泵浦工作介质。同时为了增加热稳定性,谐振腔直接在纯的工作介质上镀膜。通过优化设计,调整工作介质、被动调Q介质的长度及输出镜的反射率,达到最佳输出效率。在器件

结构方面,采用最少光学元件的谐振腔和免调结构,以满足激光器体积小和抗震性方面的要求。器件所有光学和机械元件封装在同一基准平板上,所有元件可以采用紫外固化胶封装,光学元件的固定架和整体结构的支撑架均选用满足航天要求的材料。采用该形式构造的激光器国外已经研制成功并公开报道过,国内一些研究机构(如上海光机所)也正在进行研制,并有望在近期研制成功。

采用三明治结构的激光器除可以减小体积、增强牢固性和可靠性外,其另一大优点就是容易获得短脉冲,可增大峰值功率。有文献报道,2000年MIT的林肯实验室在采用10W LD泵浦的情况下,设计了类似结构的NdYAG激光器,获得脉冲宽度310ps,单脉冲能量250μJ,峰值功率565kW,重复频率几千赫兹^[7]。另外,清华大学柳强等人研究的LD光纤耦合端面泵浦Cr⁴⁺YAG被动调Q NdYVO₄激光器,在泵浦功率3.5W条件下,获得脉宽11.7ns,重复频率22kHz的调Q输出^[8]。这些都可以说明,采用激光二极管泵浦、被动调Q的NdYVO₄等固体激光器,可以满足本项目的设计要求。

3.5 驱动电源

以设计要求的激光引信测距系统的发射峰值功率200kW为准,经初步估算,如果激光器发射的脉冲宽度为5ns,重复频率为1kHz,则要求激光器的单脉冲能量和平均功率分别为1mJ和1W,以半导体泵浦激光器的电光效率为10%来计算,需要10W的输入电功率。激光器的驱动电源效率可以达到90%,则总的电功率在11W左右。考虑到激光二极管的安全问题,电源一般采用慢启动方式,启动时间在0.2秒左右。同时考虑到激光介质的热稳定等效效应,器件从电源启动到正常工作需要约1~2s时间,因此,希望激光器能在开始测量高度之前2s提前启动。拟采用28V直流电源供电,连续工作时输出电流值为2A,准连续工作时输出电流为60A。为节省功耗,器件采取被动冷却的方式。由于激光器工作时间较短(弹头的下落速度很快,引信系统从开始启动到引爆,一般只有几秒钟的工作时间),且所采用的NdYVO₄等工作介质的吸收光谱范围宽,因此被动冷却方式基本能达到要求的温控范围,不会造成器件输出功率的大幅度变动。

目前,国外已经有成熟的直流电压模块,可以此模块为基础研发激光引信专用的驱动电源。从28V

直流输入,到输出激光脉冲的效率预计可大于5%。弹头上一般要安装四套引信测量装置,四路激光器的供电由一个统一的供电电源来完成,各路电源并行工作,确保各路激光器工作在相同的条件下。

LD的驱动电源也是激光器件中的一个重要环节,其必须具备高可靠性和抗干扰能力,以及体积小、重量轻的特点。目前利用半导体泵浦的固体激光器光光转换效率可达到15%左右,半导体驱动电源的效率可达到40~50%,以激光器的平均功率1W来计算,要求半导体驱动电源的功率在12W左右。

4 总结

本文参考并借鉴了国际上先进的激光器研制技术,设计了一种适用于弹道导弹激光引信上的二极管泵浦全固体激光器方案,设计中采用吸收带宽较宽的NdYVO₄或者YbYAG作为工作介质,端面泵浦形式,利用Cr⁴⁺YAG晶体进行被动调Q,激光器的整体结构采用先进的三明治形式构造。所设计的激光器具有体积小、重量轻、高重频、高峰值功率、坚固耐用等优点,能较好满足弹道导弹激光引信的作战使用要求,具有较高的实际应用价值。该方案已通过有关专家评审,下一步将通过研制试验样机来检验设计方案的合理性与可行性。

参考文献:

- [1] 李玉清.近20年来国外导弹引信技术研究与发展概况[J].制导与引信,2002,23(3):1-8.
- [2] 张承铨.国外军用激光仪器手册[M].兵器工业出版社,1989.
- [3] 柳强,巩马理,闫平等.LD泵浦的YbYAG激光器最新进展[J].激光与红外,2002,32(1):3-6.
- [4] 吕百达,马虹.二极管泵浦固体激光器研究的一些新进展[J].激光与红外,2000,30(2):67-70.
- [5] 陈军,李东明,周涛.LD端面泵浦微片固体激光器实验研究[J].激光与红外,2002,32(5):312-314.
- [6] 陈卫标,Nobuo Takeuchi.LD抽运的Cr⁴⁺YAG被动调Q NdYAG激光器[J].中国激光,2002,29(5):385-388.
- [7] John J Zayhowski. Passively Q-switched Nd YAG microchip lasers and applications [J]. Journal of Alloys and Compounds. 2000,303-304:293-400.
- [8] 柳强,巩马理,闫平,等.LD光纤耦合端面泵浦NdYVO₄/Cr⁴⁺YAG激光器[J].激光技术,2002,26(6):401-406.