

# 军民通用的高能固体激光器

李 港      陈 桦

高能激光器,也称为强激光器,其定义目前尚未制定标准。对于军用高能激光器,其平均输出功率需在 20 千瓦以上;而对于防空反导军用强激光器,其平均输出功率需 100 千瓦以上。对于工业民用强激光器,其平均输出功率需 5 千瓦以上。因此,对于 20 千瓦以上的强激光器,军民是通用的。当前,固体强激光器的军用与民用型开发已成为强激光器技术开发的热点之一。

在军用的反导方面,以美国为代表的采用 GGG 晶体材料的热容型固体强激光武器预研已经投入巨资开展 6 年了,计划于 2007 年演示 100 千瓦的平均输出功率能力,并计划装备战斗机、无人机、轻型车辆、甚至便携式使用,随着其平均输出功率的增大,将对化学强激光武器的发展形成竞争实力;在工业民用方面,以日本为代表的采用 YAG 晶体的固体强激光器,已达到 13 千瓦的平均输出功率,将取代体积和重量大、耗能多的工业气体强激光器。

因此,尽快高效开发具有我国独立知识产权的军民通用固体高能强激光器,对于国防和经济发展都具有重大意义。本文主要分析高能固体激光器的主要类型特点和军用、民用内容。

## 1 固体高能激光器崛起的原因

自激光诞生以来,激光武器就一直是人们研究的重点方向之一。被选择的激光器有化学激光器、CO<sub>2</sub> 激光器、钕玻璃固体激光器、自由电子激光器等,其中钕玻璃固体激光器在竞争中处于劣势地位,主要原因是钕玻璃激光器的转换效率低,不能高重复频率工作,以及光束质量差等。但是近几年来,随着固体激光技术的发展,高能固体激光器的发展受到了高度重视。

### 1.1 采用半导体激光器泵浦源

以前是用闪光灯进行泵浦,但在闪光灯的发射光谱中,只有一小部分与激光晶体的吸收光谱相重合,被吸收而转化为激光,绝大部分能量转化为热而浪费掉,因此转换效率很低。随着半导体微流道冷却技术的发展,半导体激光器的输出功率大幅度增加,使得半导体激光器作为高能固体激光器的泵浦源成为可能。由于半导体激光器发射光谱与激光晶体的吸收光谱基本重合,故转换效率大幅度提高。同时由于半导体激光器的体积小、重量轻,高能固体激光器的体积和重量也随着大幅度减小。

### 1.2 诞生新型晶体材料

以前由于没有 GGG 晶体,其它固体激光晶体包括 YAG 晶体的体积均较小,只有钕玻璃能够生长成大体积材料,因此只能选择钕玻璃作为高能固体激光器的激光工作介质。而钕玻璃的发射截面小和热导率低,使得高能固体激光器转换效率低和不能高重复频率工作。近年来,随着大体积 GGG 晶体生长技术的日趋成熟,同时由于它的发射截面和热导率均比钕玻璃大,因此 GGG 晶体取代了钕玻璃作为高能固体激光器的激光工作介质,从而大大提高了高能固体激光器的转换效率和工作重复频率。

### 1.3 运用泵浦-冷却交替工作方式

以前固体激光器的运转方式是泵浦和冷却同时进行,这样在激光晶体截面内温度的分布是不均匀的,存在着温度梯度和热内应力,使得激光光束质量变坏和有效传输距离缩短。热容激光器的诞生是高能固体激光器运转方式的革命性变革,它的特点是泵浦和冷却交替进行,这样做的优势是:输出激光时,激光晶体横截面内温度分布基本一致,没有温度梯度和热内应力,激光的光束质量非

常好,激光可以进行远距离的有效传输。

总之,由于上述三方面原因,使得高能固体激光器在转换效率、重复频率、工作寿命、光束质量、激光能量等诸方面均可与其它种类的激光器相抗衡,而在体积小、重量轻、运行成本低这三方面,更是优于其它种类激光器。因此高能固体激光器已成为激光武器必选部件方案之一,并且是唯一具有便携式激光武器发展前途的激光器。

## 2 高能固体激光器两大类型简析

目前,高能固体激光器开发主要有两大类型:采用 GGG 晶体材料和 YAG 晶体材料的高能激光器。GGG 是“掺有钕(Nd)和铬(Cr)元素的钆镓石榴石晶体材料”的英文缩写;YAG 是“掺钕钇铝石榴石晶体材料”的英文缩写。

GGG 晶体内部掺 Nd 后,可用较小的晶体产生较高能量的激光。GGG 晶体表面一层掺 Cr,可使介质有较高的工作效率。其晶体面积比较大( $13\text{cm} \times 13\text{cm}$ ),有高比热和高热导率,可使激光器具有较长的发光时间。GGG 晶体的最大优点是生长尺寸大,因此激光输出能量也大;其缺点是发射截面小,转换效率低于 YAG,并且晶体生长技术复杂、成本较高。YAG 晶体的优点是发射截面大、转换效率高、技术成熟、成本低。其缺点是生长尺寸相对较小。

目前国内出售的 YAG 晶体的最大尺寸为  $20 \times 20 \times 200\text{mm}^3$ ,国外出售的 YAG 晶体最大尺寸是  $20 \times 20 \times 250\text{mm}^3$ ,而国外出售的 GGG 晶体最大尺寸可达  $200 \times 200 \times 200\text{mm}^3$ 。因为半导体激光阵列是密布于晶体表面的,晶体尺寸越大,意味着允许排列的半导体激光器数目就越多,泵浦能量相应就越大,输出激光能量也越大。而每个激光头的输出能量大,为达到相同的总能量,所需激光头个数就可以减少,整个激光器的总体积和总重量随之下降。

就 GGG 激光器和 YAG 激光器来说,它们都能输出很高的激光能量,都能满足攻击型激光武器摧毁敌飞机和导弹的要求。所不

同的是:为达到相同的总能量,GGG 激光器每个激光头的体积大,所需激光头的个数少,总体积和总重量小;YAG 激光器每个激光头的体积小,所需激光头的个数多,相对来说总体积和总重量大。故军用高能固体激光器的首选激光晶体是 GGG 晶体,而作为民用高能固体激光器,体积和能量相对来说是不太重要的,成本和价格是优先考虑的因素,故 YAG 晶体是首选激光晶体。

就国内目前情况而言,GGG 晶体的生长尺寸还非常小,达不到要求。从实用的角度看,具有优良光学性能的 GGG 晶体尺寸至少要大于 YAG 晶体的最大尺寸,即大于  $20 \times 20 \times 200\text{mm}^3$  时,才具有实用意义。因此在研究的第一阶段,应先进行  $20 \times 20 \times 200\text{mm}^3$  Nd:YAG 晶体高能固体激光器的研究,同时进行大尺寸 GGG 晶体生长技术的研究。对于高能固体激光器来说,无论是用 GGG 晶体,还是用 YAG 晶体,它们的半导体激光泵浦技术、谐振腔技术、冷却技术等许多技术都是共同的,因此等 GGG 晶体生长到  $20 \times 20 \times 200\text{mm}^3$  的尺寸后,直接用 GGG 晶体替换 YAG 晶体,即可由民用激光器转化为军用激光器售出,创造经济效益。

## 3 反导防空军用和工业民用

### 3.1 反导防空

美陆军正考虑采用激光便携式防空反导武器,替代肩射式 FIM-92“毒刺”导弹。美陆军希望固体热容激光器技术的发展不仅能使它成为机动性强的防空系统,而且也能用作便携式武器,期望固体强激光便携式防空武器能够在战场上快速重新充电,对目标进行连续射击。目前,正在试验这种新式防空系统反炮弹、巡航导弹和无人飞行器的效果。要把它与防空导弹系统混合编队使用,这样可以起到互补的作用。

### 3.2 工业加工

#### 3.2.1 激光切割:

利用高能大功率激光可对各种材料进行切割,其特点是无接触性切割,具有切割速度

快、质量好、精度高、切缝窄、可对非常厚的材料进行切割等优点。利用计算机进行控制,即可进行平面任意复杂形状的切割,也可进行立体切割。例如:汽车外壳成型后,需要在车灯、前后窗、天窗等部位进行三维立体切割。传统的方法是利用模具冲压切割,需要制作几十个模具,成本高、效率低、质量差;采用激光进行立体切割,前后十几分钟即可解决问题。速度快、质量好、同时大大降低了生产成本。

对于非金属材料,激光切割也有巨大的优越性。例如:陶瓷材料硬而脆,普通方法很难切割,利用高能激光切割就很容易。在服装工业,利用激光对多层织物进行切割,质量好而速度快,生产效率大为提高。一次性饭盒,通常是用刀具进行切边,在转弯处切边质量差而速度慢;利用激光可以高质量、高速度进行切边,成为一次性饭盒生产加工的发展方向。

### 3.2.2 激光打孔

利用激光可在各种材料上进行打孔,可以打直径小而深度大的孔,以及各种异形孔,尤其适合于一般方法难加工的高硬度材料打孔。激光打孔的生产效率是机械钻孔的 200 倍,生产成本是机械钻孔的 1/21/7。美国雷声公司用功率为 500W 的 Nd:YAG 激光在镍钴合金发动机叶片上打孔,孔径为 2.50.76mm,深度可达 20.3mm,该系统全部参数用计算机数控确定。美国国际商用机器公司用计算机控制激光打孔专用机,在 20 层印刷电路板上一次性打孔,效率很高。英国英材斯卷烟机械公司用激光在香烟上打孔,每分钟打 300 万个小孔。

### 3.2.3 激光焊接

利用激光可以对各种金属材料进行焊接,尤其是普通方法难以焊接的铝合金等。高能大功率固体激光焊接的焊缝强度是传统焊接焊缝强度的两倍,而焊接速度则快两倍多。

由于铝合金难以焊接,目前飞机外壳基本上是铆钉铆接。如果改用激光焊接,连接强度更高,寿命更长,且飞机自重下降 15%,

成本下降 20%。

轮船船壳都是成百上千名焊工用焊枪将钢板一块块拼接起来的,常常由于工人疲劳或注意力不集中,引起焊接质量问题,需再返工,速度慢而效率低。采用激光进行焊接,速度快、效率高、质量好,生产成本大幅度降低。

潜水艇为了增强抗攻击性,目前均采用双层船壳,但双层船壳之间间隙小,加上潜水艇内部空间小,用普通方法进行焊接非常困难。采用光纤传输的激光进行焊接,由于光纤体积小,柔韧性好,焊接起来非常容易。

美国结构汽车公司,用激光焊接汽车底盘,仅汽车传动装备和底盘部分就有 21 台激光器在运行。

### 3.2.4 激光表面处理

包括激光表面淬火、退火及激光表面熔覆等。

激光表面淬火是一种提高金属表面强度和耐磨性能的新工艺,适用于深孔、小孔、盲孔、小槽的内壁硬化和大型零件表面、复杂形状零件表面的硬化。美国通用汽车公司用激光对转向器内孔表面淬火,使耐磨性提高了 10 倍,生产成本仅为电炉整体淬火的五分之一。

激光退火也已广泛应用于集成电路的生产过程及太阳能电池的生产过程中。激光熔覆是在金属零件表面外加涂料,经强激光照射后,形成与基底不同性质的合金层,目的在于提高金属零件表面的抗磨、抗热、抗腐蚀、抗氧化等性质。例如在轧钢生产中,由于是在高温下轧制钢板,普通热轧棍的工作寿命只有几十个小时,然后整件报废,生产成本很高。利用激光在热轧棍表面烧熔一层钴基合金,其工作寿命可延长至几百小时,且可以重复熔覆钴基合金,反复使用,即提高了生产效率,又有效降低了生产成本。

### 3.2.5 激光分离同位素

核电能已成为越来越重要的能源之一。核电站反应堆所用燃料为铀的同位素  $U^{235}$ ,而天然铀中大部分是  $U^{238}$ ,  $U^{235}$  很少,需要将  $U^{235}$  分离出来。激光分离同位素是将高能激光照射到天然铀上,利用  $U^{235}$  和  $U^{238}$  能级的

微小差异,使激光波长正好对应  $U^{235}$  的吸收峰,将  $U^{235}$  电离变为正离子,在高压电磁场作用下被吸附到收集器里,而  $U^{238}$  仍是原子状态,不受高压电磁场的影响,从而达到分离同位素的目的。

激光分离同位素的优点是分离系数高、产量高、能耗低、成本低,是世界各国研究的重点。利用激光分离同位素技术,美国已经成功分离铀同位素,它是中子弹的原料。

### 3.2.6 激光大气通信

在两幢高层建设物之间进行通信,如果用光缆或电缆,需要在两建设物之间挖沟埋设,因城市内高楼和道路密集,建设成本很高。如果采用激光大气通信,将激光通信装置安装在楼顶上,通信成本低而有效。

为保持运动行进中各部队之间的联系,采用有线通信十分困难,只能采用无线通信。但无线通信保密性差,部队容易暴露目标。如果采用激光大气通信,可解决上述问题,既保持了行进中部队之间的联系,又不易暴露

目标,保密性也很好。

### 3.3 机场激光驱雾、驱鸟与防空一体化

近年来,全国各地的机场常常被大雾封锁,有时甚至连续几天浓雾,使得飞机不能起飞和降落,旅客滞留,经济损失巨大。如果用高能激光进行照射,雾中的微小水滴吸收激光光能升温而汽化,使大气变得透明,可保证飞机的正常飞行。

在晴天,可利用激光进行驱鸟,保证飞机起飞和降落时的安全。高能固体激光器也可以作为机场防空武器,击落来犯的敌机或导弹。显然,将激光驱雾、激光驱鸟、激光防空三位一体,可避免机场设备的重复和浪费,也能提高固体强激光器的有效使用率。

可以预见,固体强激光器以及由其构成的防空反导武器系统,将具有十分广泛的军用与民用前景。

李港,北京工业大学激光工程研究院教授,博士生导师

陈博,北京工业大学激光工程研究院副教授,硕士生导师

(上接 53 页)电池的一致性,短路、穿钉情况下的安全性,对恶劣的工作和储存条件的适应性等)外,还必须优化组合电池的整体性能(如各单体电池的合理匹配、智能管理、整体安全性及与激光二极管阵列的匹配、与内燃机驱动发动机的匹配等)。

目前国内锂离子电池技术及产业化能力已基本上能够满足热容固体强激光器发展的需要。但仍需要对激光二极管阵列及内燃驱动发电机间的匹配及安全问题进行大量艰苦的开发研究,需增加模块测试条件,完善电池模块模拟测试仪,并在项目的每个阶段都要进行电池组的安全测试,最大限度地提高安全系数。

## 4 结束语

热容固体激光器技术是发展固体强激光武器的关键技术基础。美国正在投入巨资开

发这种技术,而且反导防空的应用前景十分明确,这无疑对我国又开始形成新的军事高技术优势。为了打破美国未来固体强激光武器的威慑与讹诈,应加强我国反导防空的高新技术储备,并积极开展我国固体强激光武器装备的预先研究。

为此,军事需求的论证研究工作也将十分必要,只有通过国家和军队反导防空的强烈需求,才能牵引和带动我国热容固体强激光器关键技术的开发以及相应武器系统系列技术的高效发展。

因此,建议国家和军队有关部门,尽快组织国、内外以及国内的军地力量,并行开展热容固体强激光武器关键技术的基础研究和防空反导的应用研究、预先研究,为我国防空反导热容强激光武器的尽快立项研制打下坚实基础。

朱化南,中国科学院物理研究所研究员