

# 1.5 $\mu\text{m}$ 波长人眼安全的军用激光测距机及其进展

卢常勇 王小兵 郭延龙 王古常 孙斌 林轶 万强

(武汉军械士官学校光电技术研究所, 武汉 430075)

**提 要** 人眼安全是军用激光测距机重要的发展趋势之一<sup>[1]</sup>。1.5 $\mu\text{m}$  是对人眼最为安全的激光波段。目前实现 1.5 $\mu\text{m}$  波长激光输出包括 Raman 频移、Er 玻璃激光器以及光参量振荡技术。介绍了三种人眼安全激光实现的技术途径和各自的特点,并对国内外装备情况和趋势进行了阐述。

**关键词** 军用激光测距机 人眼安全 1.5 $\mu\text{m}$  激光

## Principle and Evolution of 1.5 $\mu\text{m}$ Wavelength Eye-Safe Military Laser Rangefinder

LU Changyong WANG Xiaobing GUO Yanlong WANG Guchang SUN Bin LIN Yin WAN Qiang  
(Opto-Electronics Facility, Wuhan Ordnance Non-Commissioned Officers Academy, Wuhan 400075)

**Abstract** Eye-safe technology is one of the important developmental direction of military laser rangefinders. 1.5 $\mu\text{m}$  is the most safe wavelength band to the human eyes. Presently there are three ways to obtain 1.5 $\mu\text{m}$  laser including Raman shift, Yb:Er:glass and optical parametric oscillator. The technology, characteristics and equipment instance of these eye-safe lasers are summarized. The future development trend of eye-safe lasers is discussed.

**Key words** military laser rangefinder eye-safe 1.5 $\mu\text{m}$

### 1 引言

第一台红宝石激光器诞生后,首先在军用激光测距机领域取得应用,经过 40 多年的研发和部队使用,激光测距机已大量配备到坦克、飞机、火炮及各种步兵武器上,显著提高了武器系统的命中精度和快速反应能力。到目前为止,第二代 Nd:YAG 军用激光测距机技术已完全成熟,并成为部队的主战装备,但在实战和训练中,暴露出了一些缺点,如对人眼不安全和对战场烟雾的穿透能力差等等。鉴于此,各国纷纷开展了新一代人眼安全激光测距技术的研究工作,其中 1.5 $\mu\text{m}$  激光波长因具有以下明显优势而成为研发的重点<sup>[2-4]</sup>:

- 1) 位于人眼最安全的波段;
- 2) 处于 1.5~1.8 $\mu\text{m}$  的大气窗

口,对战场烟、雾的穿透能力强;

3) 目标与背景有较高的对比度,在相同条件下测距能力更强;

4) 对应于室温工作的 Ge 和 InGaAs 探测器的探测灵敏区,无需低温制冷。

### 2 1.5 $\mu\text{m}$ 波段人眼安全激光测距机

#### 2.1 钕玻璃激光测距机

##### 2.1.1 工作原理及国内外装备应用情况

钕玻璃(Yb:Er:glass)激光器是以钕玻璃作为工作物质,利用闪光灯抽运,直接输出 1.54 $\mu\text{m}$  人眼安全激光的固体激光器,适用于手持式或车载激光测距机。表 1 是国外装备的手持式钕玻璃人眼安全激光测距机。

此外,澳大利亚 ADI 公司的 ESLR-1000 人眼安全钕玻璃激光测距机设计用于步兵、装甲兵和炮兵,测程为 12km,精度 4m,使用 ADI 申请专利的 MTR (多目标回波)方法可以实现用一个激光发射为所有捕获的目标提供测距,目前已在加拿大和马来西亚部队进行实验,正在为澳大利亚部队供货。美国 ALST 公司的 ELRF 系列远程人眼安全激光测距机也是基于钕玻璃的人眼安全激光器,测程最高可达 50km,重频 1Hz 时,可连续工作 3min,随后冷却 1min。所有型号都是坚固耐用、密闭、干氮气净化系统,具有在恶劣的军事环境下应用的能力。该公司的 Falcon 系列小型人眼安全激光测距机使用分立的瞄准器,可用于侦察、监视、

收稿日期: 2004-09-03

作者简介: 卢常勇(1979-),男,助理讲师,主要从事光电子技术与军用激光器件的研究与设计。

表 1 手持式钼玻璃人眼安全激光测距机

研制者	型号	脉冲能量 /mJ	测程/精度 /m	调 Q 方式	重量 /kg
美国 Kigre 公司	LB-7	8~15	9995/5	转镜	2.5
澳大利亚 AWA 公司	PALM-10		10000/5	转镜	2.0
俄罗斯 Polyus 研究所	BLRF		10000/5	FTIR	2.0
法国 Kazuko 公司	HH-83		8000/3	转镜	2.0
挪威 Simrad 公司	LE-7	8	9995/5	转镜	2.5
美国 Contraves	MLRF100	5~7	4096/1	转镜	<0.6
斯洛文尼亚 Fotona d d	RLD-E		9995/3	转镜	2.5
美国 Litton 系统公司	SIRE IV	10	9995/5		

UAV、地面车辆、手持式传感器、火控系统和辅助导航。美国 Litton 公司生产的 Abrams 人眼安全钼玻璃激光测距机用于主战坦克和 Bradley 步兵战车上, 与 Nd:YAG 的接口相同, 输出能量约 10mJ, 最大测程 7995m, 精度 10m, 可在 1Hz 连续工作 2min。该公司的 AN/PVS-6 MELIOS 小型人眼安全激光红外观测装置是轻型的手持式或安装在三角架上的钼玻璃激光测距机, 能以 5m 的步进量确定 50~9995m 的距离, 是构成先进逻辑监视系统(LRAS3)演示计划的一部分, 用于美国陆军夜视和电子传感器管理局正在开发的侦察车辆上。英国 Avimo 公司也在开发一个可以集成到 Avimo 或其它瞄准或火控系统的人眼安全钼玻璃 LRF (激光测距机)模块, 以 0.2Hz 连续工作, 计划适用于陆地和空中。

国内西南技术物理研究所、常州第二电子仪器厂等单位也已经研制出钼玻璃激光测距机, 其中常州第二电子仪器厂的某型号手持人眼安全激光测距机, 采用转镜调 Q, 现已进入批量生产阶段, 不久将装备部队。

### 2.1.2 关键技术及发展趋势

由于钼玻璃属于三能级系统, 激活离子浓度低, 受激发射截面

小, 对腔内损耗和温度都很敏感, 造成器件增益小、效率低、阈值高、高温特性差, 加之基质是磷酸盐玻璃, 其物理机械特性也较晶体材料差。从军事应用角度分析, 钼玻璃激光器的主要缺点包括:

1) 转换效率低。产生 25~30mJ 的激光输出需要 12~15J 注入能量, 效率约 2%, 这是国内外见诸报导的较好的水平;

2) 尚无成熟的被动 Q 开关, 且脉冲较宽。早期采用旋转反射镜或玻璃棱镜调 Q, 美国光电公司、Kigre 公司和俄罗斯都有报导采用这种方式实现人眼安全激光测距机。日本 NEC 公司采用受抑全内反射(FTIR)技术调 Q, 得到了窄脉冲输出;

3) 重复频率低。钼玻璃热特性较差, 高重复频率工作困难大, 可以满足每分钟六次的单次测距机要求。近来美国 Varo 公司已研制出 1Hz 非冷却系统, 用于 AN/PVS-6 微型人眼安全激光红外观测仪(MELIOS)中, 它输出 15mJ/30ns, 持续工作 30s, 休息 2min 后可重复工作。若用循环液冷却, 可在 20Hz 条件下运转。目前用激光二极管抽运钼玻璃也得到了深入的研究, 美军已实现了 20.5mJ 的输出, 斜效率达 14%, 采用转镜调 Q 时, 重复频率可达 7Hz; 俄罗斯也

实现了 20mJ 的输出, 重复频率 0.1Hz。

## 2.2 受激拉曼频移(Raman shift) Nd:YAG 激光测距机

### 2.2.1 工作原理及装备应用情况

在拉曼频移 Nd:YAG 激光测距机中通常用甲烷做拉曼介质, 用 Nd:YAG 激光器的 1.06 $\mu$ m 激光作为抽运光, 就可以得到人眼安全的 1.54 $\mu$ m 斯托克斯光。通常约 10cm 长的甲烷盒对 40mJ Nd:YAG 激光的转换效率为 30%~40%。拉曼激光器有两种结构形式: 外腔式和内腔式。外腔式结构简单, 调整方便, 转换效率达 40%, 可满足实用要求。内腔式结构较复杂, 调整较难, 但总体效率较高。拉曼频移激光器的特点是光束质量好, 可在一定的重复频率下工作, 目前装备上最高为 20Hz, 可用于手持式、车载激光测距机, 更适用于舰载或防空火控系统中激光测距。

目前, 拉曼激光测距机已经大量装备部队。法国 CILAS 公司生产的 THS304-06 人眼安全拉曼激光测距机, 其工作距离达 40000m, 重复频率为 20Hz, 精度为 4.5m, 主要用于防空火控系统, 显著提高了该系统光电或雷达的性能。该公司还分别生产了型号为 TMS314 和 TMS 303/309 的人眼安全拉曼激光测距机, TMS 314 主要用于地对空或轻重型海上炮塔上, 测程可达 20000m; TMS 303/309 主要用于坦克和直升机的火控系统中, 测程同为 20000m。美国 DRS 光电系统集团(EOSG)为美国陆军 ITAS 计划开发的 AMREL 系列人眼安全激光测距机, 同样采用拉曼频移技术和无源 Q 开关技术、短脉冲输出、高重复频率, 并且没有机械零件, 测程为 20000m, 精度 5m。通过普通的模块方法, 可以将该系统应用于地面车辆的火控系统、直升机、固定翼和

UAV飞机以及海军和手持式装置。以色列 Elop 光电工业公司也开发了轻而小的、测程达 20000m、能单独使用也能集成在防空炮火控制系统中的 HRLR-ES 高重复频率拉曼激光测距机,由微处理器控制,且装备串行通讯输出装置,目前已在以色列空军服役。表 2 为国外近年来开发的人眼安全拉曼激光测距机。

国内,西南技术物理研究所已成功开发出实用化的手持式拉曼激光测距机,重复频率可达 15Hz;由扬州 5308 厂生产的 93-200 式人眼安全拉曼激光测距机已大量装备部队。

### 2.2.2 关键技术及发展趋势

拉曼激光器的关键技术是高密度的抽运光功率和高效率的拉曼介质。其缺点是由于采用高压气体作转换介质,造成重复频率低、体积较大和结构复杂等,且存在密封难、高低温试验难等工艺难点,适用低重复频率的手持、车载、舰载和防空火控系统中。此外,受到甲烷气体化学击穿及其产生的碳

化物可能沉积到拉曼盒窗口上的限制,一般输出约为 20mJ,更高输出或重复频率运转需采用循环气体拉曼盒,造成体积大,且高压密封技术难度大、可靠性差。为了改善拉曼激光器的热效应,人们尝试用氘 ( $D_2$ ) 作为拉曼介质,获得了 1.56 $\mu\text{m}$  激光输出,单脉冲能量为 135mJ,重复频率日本国内 10Hz,但与甲烷相比效率略低。值得一提的是,近年来固体拉曼激光器得到较大发展,利用硝酸钡 [ $Ba(NO_3)_2$ ] 作为固体拉曼介质,得到了接近衍射极限的 1.56 $\mu\text{m}$  激光输出,单脉冲最大输出 250mJ,重复频率日本国内可达 100Hz,是种很有前途的激光器。

### 2.3 光参量振荡器(OPO)激光测距机

#### 2.3.1 工作原理及装备应用情况

光参量振荡技术<sup>[9]</sup>是利用具有一定功率密度的抽运光作用于非线性晶体,当满足相位匹配条件时,产生信号光和闲频光,对信号光加以谐振腔技术,振荡放大,获得人眼安全的 1.5 $\mu\text{m}$  波长输出。

光参量振荡是实现波长转换的有效措施,通过定向切割非线性晶体,可以实现选定波长的激光输出。近年来,由于研制出了非线性系数大、破坏阈值高的优质非线性晶体,如 KTP、BBO、KTA 等,使得 OPO 的转化效率大大提高,可达 47%。利用 KTP 作 OPO 晶体,II 类非临界相位匹配,可将 1.06 $\mu\text{m}$  的 Nd:YAG 激光变化为 1.57 $\mu\text{m}$  的人眼安全激光。OPO 器件可分为单谐振器件 (SRO) 和双谐振器件 (DRO)。DRO 是将两个光波同时共振,使得频率和功率都不易稳定,因此通常采用 SRO 方式。OPO 的特点是可高重复频率日本国内运转,束散较大,很适合用于高重复频率日本国内的舰载或防空光电火控系统,且波长可调,可根据 1.5~1.8 $\mu\text{m}$  的精细大气传输窗口,将其输出调谐到最佳的波长。OPO 激光器是固体器件,结构紧凑,可靠性及效率都比拉曼激光器高,KTP 晶体的热特性也比钼玻璃好,故其重复频率比以上二者都高。

OPO 激光技术是 20 世纪 90 年代初逐步走向成熟的,美国 BIGSKY 公司最早将其应用于光电跟踪及火控系统,输出 25mJ,重复频率 20Hz,测程达 20km 以上。近年来美国 Litton 公司也研制出 CVTTS AFV 人眼安全 OPO 激光测距机,作为美军目前及未来装甲战车热瞄准系统中的独立分系统,测程 9000m,精度 10m。奥地利 NGI 公司也研发了型号为 Teleranger HX/HL 的陆用 OPO 激光测距机,精度可达 1m,可

表 2 国外近年来开发的人眼安全拉曼激光测距机

研制者	型号	脉冲能量 /mJ	测程/精度 /m	重复频率	重量 /kg
南非 Eloptro 公司	LH-40	8	20000/5		1.5
南非 Eloptro 公司	LR-40	17~23	40800/5	20	13.325
美国 Raytheon 公司	ELITE II		20000/10	1	
美国 Raytheon 公司		35		20	
瑞典 Saab Dynamics AB 公司		30	20475/5	25	11.5
德国 Zeiss-EO 公司	CE628/634	14	19995/5	1	3.2
德国 Zeiss-EO 公司	Halem II	10	25000/5	0.5	2.5
德国 Zeiss-EO 公司	Molem	10	30000/5		2.5

表 3 三种人眼安全激光技术的比较

类型	输出波长 / $\mu\text{m}$	体积	重量	结构	重复频率	阈值	调 Q 方式
钼玻璃激光器	1.54	小	重	较复杂	低	高	转镜或受抑全内反射
拉曼激光器	1.54	大	重	复杂	低	低	被动或电光
OPO 激光器	1.54~2.0	中	轻	简单	高	低	被动或电光

安装于武器上,具有各种用途。瑞典 Saab Dynamics 公司开发了用于陆军和海军的小型火控系统的轻型人眼安全 OPO 防空激光测距机,可探测 10000m 范围内的空中目标,输出能量 10mJ,重复频率为 10Hz,正在评估和验证中。

电子部 11 所、西南技术物理研究所在 1995 年前后相继开展 OPO 激光技术研究,目前西南技术物理研究所的小型化器件已获得 1.57 $\mu\text{m}$  OPO 输出 25.7mJ,重复频率 20Hz;常州第二电子仪器厂的手持式 OPO 激光测距机已通过鉴定,即将用于某轻型测地系统;我所开发的定向棱镜腔 OPO 激光

器,采用专利技术,大大简化了激光器的调试工艺,具有高稳定、相对理想光束质量等优点,实现了工程实用化。

### 2.3.2 关键技术及发展趋势

OPO 激光器有赖于大的质量优良的非线性晶体的生长,以及镀膜技术的完善。OPO 容易引起光学损伤,其输出光束质量较差,原端发散角往往达到 8mrad 以上,这使得手持测距机体积增大,采取高斯镜技术可改善输出光束束散度<sup>[6,7]</sup>。OPO 技术一个重要发展方向就是对其输出激光波长进行调谐,这点在光电对抗中具有重要意义,而 OPO 技术与二极管抽运技术相结

合,实现全固化、高重复频率日本国内激光测距机/目标指示器多功能集成,是 OPO 人眼安全另一个重要的发展方向。

### 3 结语

近期内,上述三种人眼安全激光技术将由于各自都很鲜明的优点和缺点共存(见表 3),使得军用的人眼安全激光测距机的装备数量更多、品种更全、质量更好,功能更强。此外,CO<sub>2</sub> 激光器、半导体激光器等其他人眼安全激光技术又成为本文所述技术的有力补充,这必将有利于促进我军激光测距的装备建设和作战能力的提高!

### 参 考 文 献

- 1 霍玉晶,杨成伟,陈千颂. 脉冲激光测距光源进展. 激光与红外, 2002, 32(3): 131~134
- 2 丁育明,杜立辉. 人眼安全激光技术及应用. 应用激光, 1997, 17(1): 37~40
- 3 金 锋,巩马理,时顺森等. 1.5 $\mu\text{m}$  人眼安全激光测距技术设计. 光电子·激光, 1998, 9(5): 439~441
- 4 时顺森,金 锋,翟 刚等. 高重复频率日本国内人眼安全波段 OPO 激光器. 光电对抗与无源干扰, 1998, (4): 19~22
- 5 柳 强,王月珠,王 骐. 发展中的光参量振荡技术. 激光技术, 1999, 20(2): 11~14
- 6 沈 磊,巩马理,闫 平等. 高斯反射率镜单谐振光参量振荡器模式分析. 光学技术, 2003, 29(2): 235~238
- 8 包照日格图,周寿桓,赵海霞等. 高光束质量 1.57 $\mu\text{m}$  的光参量振荡器. 中国激光, 2003, 30(5): 395~397

(上接第 31 页)

- 19 Bakaltcheva I B, Ligler F S *et al.*. Multi-analyte explosive detection using a fiber optic biosensor. *Analytica Chimica Acta*, 1999, 399: 13~20.
- 20 陈 扬,陆祖宏. 生物分子的纳米粒子标记和检测技术. 中国生物化学与分子生物学报, 2003, 19(1): 1~4
- 21 Hines M A, Guyot-Sionnest P. Synthesis and Characterization of Strongly Luminescing ZnS-Capped CdSe Nanocrystals. *J. Phys. Chem.*, 1996, 100: 468~471
- 22 Dabbousi B O, Rodriguez-Viejo J, Mikulec F V *et al.*. (CdSe)ZnS Core-Shell Quantum Dots: Synthesis and Characterization of a Size Series of Highly Luminescent Nanocrystallites. *J. Phys. Chem.*, 1997, 101: 9463~9475
- 23 Anderson G P, Rowe-Taitt C A, Ligler F S. Raptor: A Portable, Automated Biosensor. *Proceedings of the First Conference on Point Detection for Chemical and Biological Defense*, 2000
- 24 Golden J P, Shriver-Lake L C, Anderson G P *et al.*. Fluorimeter and tapered fiber optic probes for sensing in the evanescent wave. *Opt. Eng.*, 1992, 31(7): 1458~1462
- 25 Golden J P, Saaski E W. Portable multichannel fiber optic biosensor for field detection. *Opt. Eng.*, 1997, 36(4): 1008~1013
- 26 Nath N, Anand S. Evanescent wave fiber optic fluorosensor: effect of tapering configuration on the signal acquisition. *Opt. Eng.*, 1998, 37(1): 220~228
- 27 Pilevar S *et al.*. Optical fiber evanescent field excited fluorosensor and method of manufacture. U. S. Patent, 6558958, 2003
- 28 黄惠杰,翟俊辉等. 光纤倏逝波生物传感器及其应用. 光学学报, 2003, 23(4): 451~454
- 29 翟俊辉,黄惠杰等. 光纤生物传感器用于核酸的特异性检测. 分析化学, 2003, 31(1): 34~37