

文章编号:1001-5078(2002)03-0131-04

脉冲激光测距光源进展

霍玉晶,杨成伟,陈千颂
(清华大学电子工程系,北京 100084)

摘要:简要介绍用于激光测距的各种光源: NdYAG 激光器、CO₂ 激光器、Erglass 激光器、喇曼频移 NdYAG 激光器、OPO 激光器和半导体激光器,并对它们的研究进展和应用前景进行了阐述。

关键词:激光测距仪;光源;人眼安全

中图分类号:P225.2; TN958.98 **文献标识码:**A

Review on Development of Laser Sources in Pulsed Rangefinder

HUO Yu-jing, YANG Cheng-wei, CHEN Qian-song
(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The laser sources, including NdYAG laser, CO₂ laser, Erglass laser, Raman shifted NdYAG laser, OPO laser and semiconductor laser, in pulsed rangefinder are introduced briefly in the paper. The development of this research and its prospect of application are also expatiated.

Key words: laser rangefinder; laser source; eye - safe

1 前言

用于脉冲激光测距的光源很多。现在比较常用的有: NdYAG 激光器、CO₂ 激光器、Er 玻璃激光器、NdYAG 喇曼频移激光器、光学参量振荡(OPO)激光器和半导体激光器。光源对激光测距仪的性能指标(测程、精度等)有很大的影响。下面将对目前常用的几种激光测距光源进行简要介绍。

2 脉冲激光测距中的光源

2.1 NdYAG 激光测距仪

NdYAG 激光测距仪工作在 1.06 μ m 的红外光波段,具有隐蔽性强,效率高,重复频率高等优点,并已有对 1.06 μ m 激光性能非常好的 Si 雪崩光电探测器(Si-APD)。

NdYAG 激光测距仪已经比较成熟。早期的 NdYAG 激光测距仪大多采用闪光灯泵浦 NdYAG 激光器作光源。如美国军方 1974 年与 RCA 公司(美国无线电公司)合作开发的便携式 AN/GVS-5 型激光测距仪就采用闪光灯泵浦的被动染料调 Q NdYAG 激光器作测距光源。由于具有效率高,热效应小,光束质量好,可靠性高,寿命长等优点,二极管泵

浦全固态 NdYAG 激光器开始取代闪光灯泵浦的 NdYAG 激光器,成为激光测距仪的新型光源,使 NdYAG 激光测距仪向全固化、小型化发展。这是近年来 NdYAG 激光测距仪的一个重要发展方向。

美国约翰·霍普金斯大学应用物理实验室 2000 年研制的用于航天器上的激光测距仪就采用二极管泵浦的 CrNdYAG 激光器,工作波长 1.064 μ m,采用铈酸锂(LiNbO₃)电光 Q 开关,脉冲宽度 15ns,单脉冲能量 15.3mJ,重复频率从 1/8 到 8Hz。其测程(高度)达 327km,精度 < 6m,分辨率为 0.312m^[1]。

另一个值得注意的 NdYAG 激光测距仪的发展方向是 Cr⁴⁺YAG 被动 Q 开关的应用。测距常用的 NdYAG 脉冲激光器有主动调 Q 和被动调 Q 两种。九十年代以来,用 Cr⁴⁺YAG 晶体作被动 Q 开关的

作者简介:霍玉晶(1946-),男,教授,1970 年毕业于清华大学精密仪器系。现任清华大学电子工程系博士生导师,激光与光电子技术研究所所长,清华(中)-Lexel(美)激光与光电子研究所所长。近期主要从事全固态激光器、激光测距仪和激光医学的研究。自 1990 年起在国内外学术杂志发表学术论文 200 余篇。

收稿日期:2001-12-20;修订日期:2002-03-13

NdYAG 激光器,特别是用(Nd^{3+} , Cr^{4+})YAG 制成的自调 Q 激光器研制成的测距仪的体积更小,重复频率更高,因而在激光测距仪,尤其是在手持式激光测距仪中具有很好的应用前景。

国内 1998 年研制的 NdYAG 激光测距样机采用 Cr^{4+} YAG 被动调 Q 二极管泵浦的 NdYAG 激光器,单脉冲输出能量 2 - 3mJ,脉宽 7.5s,光束为 TEM_{00} 模,发散角为 0.68mrad,探测器采用 $\varnothing 800\mu\text{m}$ 的 Si-APD 器件,工作频率 16.2Hz,在 $\sim 3\text{km}$ 的能见度下,实现了 3.39km 的测距,最大测程为 4.7km ($\sim 5\text{km}$ 能见度)^[2]。在 2000 年的 SPIE 会议上, Vincent Delaye 等人报道了二极管泵浦 (Cr^{4+} , Nd^{3+})YAG 被动调 Q 微片激光器,工作波长 1.064 μm ,脉冲宽度 2.5ns,峰值功率 1.5kW。以此激光器为光源研制的激光测距仪,单次测量精度 $\pm 5\text{mm}$,测程达 250m^[3]。图 1 为该微片激光器。

虽然 NdYAG 激光测距仪广泛装备于部队中,并且直到现在仍然在激光制导等应用中起着很重要的作用,但由于它的对人眼不安全,大气传输能力差,不能与 8 ~ 12 μm 波段热成像系统兼容等缺点,限制了其应用。

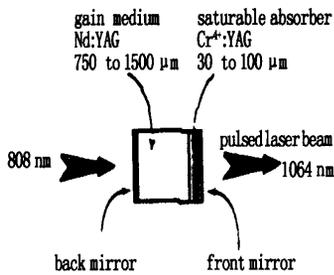


图 1 二极管泵浦 Cr^{4+} , NdYAG 微片激光器

2.2 CO_2 激光测距仪

七十年代末国际上开始研制人眼安全激光测距仪。 CO_2 激光测距仪就是最早研制的一种,它在八十年代得到迅速发展,现在已经比较成熟。

CO_2 激光测距仪克服了 NdYAG 激光测距仪的缺点,具有对大气的穿透能力强,与 8 ~ 12 μm 波段的热成像系统兼容,对人眼安全等优点,因而在军事上得到广泛应用。各国均在部队中大量装备 CO_2 激光测距仪。

1999 年,国内报道了工程型人眼“安全” CO_2 激光测距机,以小型封离式 TEA CO_2 激光器为光源。其单脉冲输出能量 30mJ,激光脉宽 (FWHM) 50ns,激光束散角 0.72mrad,接收视场 $\sim 1\text{mrad}$ 。测距仪的测程范围为 150m ~ 7.4km,测距误差 $\pm 5\text{m}$ ^[4]。

近年来,还发展出一种同位素 $^{13}\text{CO}_2$ 激光器,输

出激光波长为 11.14 μm 。和 10.6 μm 的 CO_2 激光相比,它在大气中的传输性能更好,特别是对水雾的穿透性能要高两个数量级^[5],在阴雨天或潮湿的条件下,可达到更远的测程,因而非常适合激光制导和激光测距应用,特别适合装备于海军军舰中。美国正在海军中装备这种激光测距仪。此外,在激光雷达系统中, $^{13}\text{CO}_2$ 同位素激光器也得到应用^[6]。

CO_2 激光测距仪的缺点是: CO_2 激光易被水分子吸收,不适合潮湿条件(11.14 μm 的 $^{13}\text{CO}_2$ 激光除外);对战术目标的反射系数低;所采用的 CMT 和 LTT(lead tin telluride)光探测器都要在低温下工作,并需要特别设计的前置放大器,以适应接收探测器的低噪声。

2.3 1.5 μm 人眼安全激光测距仪

在发展 10.6 μm CO_2 激光测距仪的同时,国际上也开始了其它波长(1.54 μm 、1.73 μm 、2.1 μm 等)的人眼安全激光测距仪的研究。现在在许多应用领域,人眼安全激光测距仪已逐步取代了 NdYAG 激光测距仪。其中 1.5 μm 波长激光由于具有对人眼最安全^[7,8],大气穿透能力强和目标反射系数高等优点,并且有与其配套的室温工作的高灵敏度 Ge 和 InGaAs 探测器,而在人眼安全激光测距仪中获得了广泛的应用。

产生 1.5 μm 激光主要有以下三个途径:

(1) 直接输出 1.5 μm 波长的固体激光器

比较成熟的是钇玻璃 (Erglass) 激光器,这也是 1.5 μm 测距常用的激光器。钇玻璃激光器采用掺入 Er^{3+} 离子玻璃激光棒并用闪光灯泵浦,产生 1.5 μm 激光。器件结构紧凑,体积小,成本低。缺点是输出能量低,寿命短;Erglass 材料制作困难;基质玻璃材料低热导系数限制重复频率,不适合高重频应用(如对空防御等),一般只用于地面目标测距(如手持式或车载激光测距等)^[8]。

随着 DPSSL 技术的发展,二极管泵浦的 Er glass 激光器也得到深入研究并取得很大进展。与传统的闪光灯泵浦相比,二极管泵浦不仅效率高,而且产生的热量少,从而不仅可以使 Erglass 激光器全固化和小型化,而且可获得更高的重复频率,更适合激光测距和激光雷达应用。此类激光器已开始取代灯泵激光器,用于人眼安全激光雷达或激光测距仪中。Ruikun Wu (Kigre 公司) 等人 1999 年报道的二极管泵浦 Erglass 激光器采用电光调 Q 或者受抑全内反射 (FTIR) 调 Q,重复频率可达 50Hz^[9],从而使 Erglass 激光测距仪可以适用于要求高重复频率的场

合。Philippe Thony 等人 1999 年报道了二极管泵浦的 $1.55\mu\text{m}$ Er, Yb glass 微片激光器, 采用 Co^{2+} LMA ($\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}\text{Co}^{2+}$) 作可饱和吸收体被动调 Q, 重复频率最高达 30kHz, 峰值功率达到 4kW。将其用于脉冲激光测距, 测程可达 2km^[10]。

近年来, 其它一些可直接输出 $1.5\mu\text{m}$ 波长的激光晶体材料的研究也取得一些进展, 如 ErLaF_3 ($1.568\mu\text{m}$)、 $\text{ErLa}_2\text{B}_2\text{O}_5$ ($1.588\mu\text{m}$)、 Cr^{4+} YAG (可调谐输出 $1.5\mu\text{m}$) 等, 但距离实用都尚有一段距离^[11]。

(2) 喇曼频移 NdYAG 激光器

喇曼频移 NdYAG 激光器是在 NdYAG 激光器中放入高压甲烷 (CH_4) 气体盒 (或氙气体等其他喇曼介质), 通过受激喇曼散射 (SRS), 把 $1.06\mu\text{m}$ 的激光波长频移到 $1.54\mu\text{m}$ 。喇曼频移 NdYAG 激光器与 NdYAG 激光器一样结构紧凑, 但价格高且结构复杂, 输出能量也不高, 一般约 20mJ/pulse。

喇曼频移激光器的特点是光束质量好, 可在较高的重复频率下工作。

图 2 为 Photon Interaction 公司 1991 年报道的喇曼频移 NdYAG 激光测距仪原理框图。NdYAG 激光器采用闪光灯泵浦, 染料调 Q 或电光调 Q, 典型脉冲宽度为 1 - 15ns, 重复频率超过 1kHz。喇曼工作介质采用 Photon Interaction 公司设计的循环流动制冷的喇曼盒代替静态喇曼盒, 降低了喇曼激光器的热效应, 提高了脉冲重复频率。采用 30MHz 的计数器测量时间, 理论测距精度为 5m^[12]。

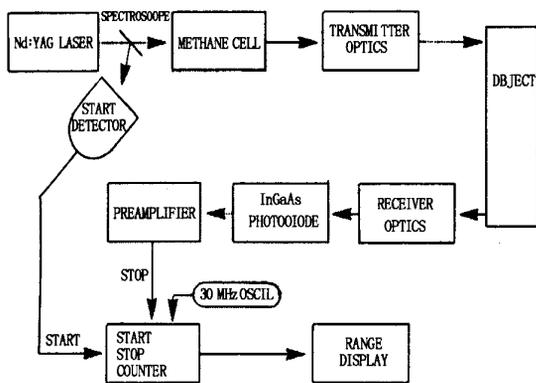
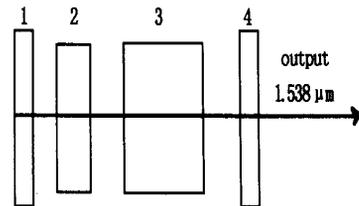


图 2 喇曼频移 NdYAG 激光测距仪原理框图

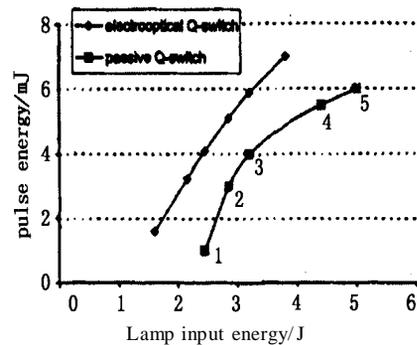
Eugene V. Raevsky 等人在 2000 年的 SPIE 会议上报道了一种用于人眼安全激光测距仪的新型喇曼频移激光器。NdKGW ($\text{NdKGd}(\text{WO}_4)_2$) 晶体既是激光晶体又是喇曼介质。通过受激喇曼散射 (SRS), 将 $1.35\mu\text{m}$ 波长的激光频移到 $1.538\mu\text{m}$ 。图 3 是该激光器的示意图。分别用电光调 Q 和被

动调 Q 作实验, 电光调 Q 得到脉冲宽度 12ns, 脉冲能量 7 - 10mJ, 重复频率 0.25Hz; 被动调 Q 得到脉冲宽度 40ns, 脉冲能量 6mJ。图 4 是分别用电光调 Q 和被动调 Q 得到的实验结果对比^[13]。



1 - Rear mirror; 2 - Q - switch; 3 - laser - rod; 4 - Trichroic output mirror

图 3 NdKGW 喇曼频移激光器结构示意图



The initial transmission of a saturable absorber is 1 - 45%, 2 - 43%, 3 - 40%, 4 - 38%, 5 - 33%

图 4 NdKGW 调 Q 激光器输出能量与闪光灯输入能量的对应关系

(3) NdYAG 泵浦的光学参量振荡 (OPO) 激光器

OPO 激光器采用 KTP 晶体 类非临界相位匹配, 输出 $1.57\mu\text{m}$ 波长的激光。 $1.57\mu\text{m}$ OPO 激光器是从八十年代末开始研究并得到迅速发展的, 颇受军方重视。美国 BIG SKY 公司, Litton 公司以及以色列光电工业公司等先后研制出 $1.57\mu\text{m}$ 人眼安全 OPO 激光测距仪。国内于 1998 年底研制成功 $1.57\mu\text{m}$ OPO 人眼安全激光测距仪。该 OPO 激光器选用水冷 LiNbO_3 电光调 Q $1.064\mu\text{m}$ (Ce, Nd) YAG 激光器作为泵浦源, $1.06\mu\text{m}$ 输出能量 40mJ/pulse, 脉冲宽度 10ns。采用外腔式单谐振 OPO 结构, 选择合适的泵浦光功率密度, 并让泵浦光两次通过 OPO 晶体, 充分利用剩余泵浦光, 大大提高了 OPO 转换的效率, 获得 12mJ/pulse $1.57\mu\text{m}$ OPO 激光输出, 脉冲宽度 $\sim 6\text{ns}$, 束散 $\sim 8\text{mrad}$, 重复频率为 1Hz, 5Hz, 12.5Hz, 20Hz 可调。测距仪选用常温下工作、带前置放大器的 InGaAs - PIN 探测器组件, 测量范围 200m \sim 7.050km, 测距精度 $\pm 5\text{m}$ ^[4]。

此外, 美国 LaSen 公司进行了 NdMgO LiNbO_3 自参量器件的研究, 于 1996 年在单块 NdMgO LiNbO_3 非线性晶体上首次实现了二极管泵浦光学参量振荡激光器 (OPOL), 并用其改装了现有的以 $1.06\mu\text{m}$ NdYAG 激光为光源的 AN/GVS - 5 手持式激光测距仪, 制成以 1.

54 μm OPO 激光为光源的 AN/GVS-5 手持式激光测距仪^[15]。

OPO 器件的优点是可高重频运转,波长可调谐,缺点是束散角较大,适合用于要求较高重复频率的舰载或防空光电火炮系统。如与二极管泵浦技术相结合,就可向全固化、高重频激光测距仪/目标指示器二合一器件方向发展,并可进一步拓展到激光雷达、激光有源干扰等其它应用领域。

人眼安全是今后激光测距仪的发展趋势,其中 1.5 μm 激光测距仪以它的优越性而成为人眼安全激光测距仪的研究热点,并在近 20 年来取得快速发展。但 1.5 μm 激光测距仪仍具有激光器能量转换效率低,脉冲能量小,不能与 8~12 μm 热成像系统兼容等缺点。此外,Ge 和 InGaAs 探测器的探测灵敏度和响应度都不如 NdYAG 激光测距仪用的 Si-APD,因而接收电路需要设计专门的低噪声前置放大组件。这些都限制了 1.5 μm 激光测距仪的应用,也对我们发展 1.5 μm 激光测距仪提出了挑战。

2.4 半导体激光测距仪

半导体激光器输出功率不高,光束发散角较大,测量距离较短;但它具有小型、长寿命、高效率、工作电压低、可调剂和全固态等优点,非常适合近距离激光测距应用,因而近年来得到迅速发展,广泛用于中短程激光测距和激光雷达系统中。

Leica 公司 1991 年报道的二极管激光测距仪采用 845nm 激光二极管,峰值功率 7.64W,脉冲重复频率 29kHz。在良好的天气条件下,测程达 4km (2900 个脉冲重复工作),即使在可见度很低的情况,测程仍可达 1km^[16]。Photon Interaction 公司 1991 年报道的 MR-101 型导弹测距仪,采用军品激光二极管作光源,探测器采用带放大器的 Si-APD,整机重量小于 250g,工作重复频率为 100Hz (最高重复频率可达 800Hz),测程 > 300m,测距精度 < 1m^[12]。国内,中国科学院上海光机所 1996 年研制的半导体激光测距仪样机选用国产半导体激光二极管,波长为 800~900nm,重复频率 1kHz。测距仪测量范围 10~100m (无合作目标),分辨率为 0.5m^[17]。中国计量学院 1999 年报道了 LF1 系列人眼安全便携式半导体激光测距仪。工作波长 905nm,重复频率 100Hz。在无合作目标的情况下,测距范围 14~1000m,测距精度 < $\pm 1\text{m}$ ^[18]。

3 结束语

本文简要介绍了几种常用的激光测距光源,并对它们的研究进展和应用前景进行了相应的阐述。随着激光测距的发展,还会有新的激光光源在脉冲激光测距中得到应用。

人眼安全是今后激光测距光源的一个必然发展趋势。如何以最有效的途径获得人眼安全测距光

源,特别是 1.5 μm 测距光源,将是人眼安全激光测距仪的一个重要研究方向。

另外,小型/微型化也是激光测距仪的一个重要发展趋势。二极管泵浦全固态激光器技术和 Cr^{4+} YAG、 Co^{12+} LMA 等被动 Q 开关材料的出现,使脉冲激光器结构更加简单,体积更小,加速了激光测距仪的小型化;用 Cr^{4+} 、 Nd^{3+} YAG 等晶体实现自调 Q 微片激光器可使测距仪更加小型/微型化。

参考文献:

- [1] Timothy D Cole, Andrew F Cheng, et al. Flight characterization of the NEAR laser rangefinder [A]. SPIE 2000, Vol. 4035:131 - 142.
- [2] 巩马理,翟刚,等. 二极管泵浦的 Q 开关 NdYAG 激光器及测距样机[J]. 激光杂志,1998,19(3):8 - 13.
- [3] Vincent Delaye, Pierre Labeye. High-resolution eye safe time of flight laser range finding [A]. SPIE 2000, Vol. 4035:216 - 225.
- [4] 封巍,封鸿渊,等. 工程型人眼“安全”激光测距机[J]. 激光技术,1999,23(2):82 - 86.
- [5] 林景全,王晓华,等. 同位素¹³CO₂ 激光器及其应用[J]. 光电子·激光,1996,7(2):119 - 124.
- [6] Daniel C Senft, Marsha J Fox, et al. Performance characterization and ground testing of an airborne CO₂ differential absorption lidar system (Phase) [A]. SPIE 1999, Vol. 3707:165 - 176.
- [7] 朱煜,陈进榜,等. 人眼安全激光测距机的一些进展[J]. 激光杂志,1998,19(6):1 - 4,10.
- [8] H S Keeter, G A Gudmundson, M A Woodall. SIRE: An eyesafe Laser Rangefinder for armored vehicle Fire control system [A]. SPIE 1991, Vol. 1419:84 - 93.
- [9] Ruikun Wu, J D Myers, et al. 50Hz diode pumped Er-glass eye-safe laser transmitter [A]. SPIE 1999, Vol. 3707:342 - 346.
- [10] Philippe Thony, Laurent Fulber, et al. Laser radar using a 1.55 μm passively Q-switched microchip laser [A]. SPIE 1999, Vol. 3707:616 - 623.
- [11] 金锋,巩马理,等. 1.5 μm 人眼安全激光测距仪技术设计[J]. 光电子·激光,1998,9(5):439 - 441.
- [12] V J Corcoran. High repetition rate eyesafe rangefinders [A]. SPIE 1991, Vol. 1419:160 - 163.
- [13] Eugene V Raevsky, Alexander V Gulin, et al. Laser oscillation of Nd KGD (WO₄)₂ in the 1.538 μm eye-safe range. SPIE 2000, Vol. 4035:363 - 366.
- [14] 时顺森,翟刚,等. 人眼安全 1.57 μm OPO 激光测距机[J]. 激光技术,2000,24(5):262 - 264.
- [15] 刘兴新,李燕兰. 国外军用固体激光技术发展现状[J]. 激光与红外,2000,30(1):7 - 10,41.
- [16] A Perger, J Metz, et al. Eyesafe diode laser rangefinder technology [A]. SPIE 1991, Vol. 1419:75 - 83.
- [17] 沈丽青,周复正,等. 人眼安全的半导体激光测距仪[J]. 激光与光电子学进展,1996,3:28 - 31.
- [18] 张在宣,余向东,等. 小型低价 LD 激光测距仪[J]. 激光与红外,2000,30(1):21 - 23.