

军用中小功率(能量) CO₂ 激光技术

封鸿渊

(西南技术物理研究所, 成都, 610041)

摘要: 本文综述了军用CO₂激光技术的状况, 作者提出了外差CO₂激光雷达应该是今后我国军用CO₂激光技术研究和发展的最重要课题。

Military middle and low power CO₂ laser technology

Feng Hongyuan

(Southwest Institute of Technical Physics)

Abstract: The development situation of the military laser technology is reviewed. It is proposed that the important subject in this area should be heterodyne CO₂ lidar in our country

一、引 言

60年代出现和迅速发展起来的激光技术已广泛渗入到了科学、技术、工农业生产、医疗卫生以及军事领域。激光在军事应用中最多的五个领域是: 1. 测距/目标指示(激光制导)、激光雷达; 2. 破坏性定向能激光武器(战略与战术激光武器); 3. 激光陀螺制导技术; 4. 激光通讯; 5. 激光模拟训练设备。其中第1项, 激光测距/目标指示(激光制导)与激光雷达的研究已经有二十多年的历史了, 它们构成了军用激光设备的最重要部分。

[3] Martial G. J O S A, 1991; A8(1): 164~170

[4] Mahajan V N. J O S A, 1982; 72: 1258~1266

[5] Welsh B M, Gardner C S. J O S A, 1991; A8(1): 69~80

[6] 阎吉祥, 周仁忠, 俞 信. 光学学报, 1992; 12(12): 1140~1143

[7] Gardner C S, Welsh B M, Thompson L A. Proc IEEE, 1990; 78: 1721~1743

*

*

*

作者简介: 阎吉祥, 男, 1946年12月出生。副教授。SPIE/COS会员。现从事光电统计学、自适应光学、激光理论、技术和应用的研究与教学。

周仁忠, 男, 1932年出生。教授, SPIE/COS会员, 中国光学学会光电技术专委会副主任兼秘书长。现从事自适应光学, 光电设计, 光电技术研究。

俞 信, 男, 1941年出生。教授, OSA会员, 中国光学学会光电专委会常务副主任。现从事自适应光学, 光电检测等研究。

早在60年代初,激光器刚问世不久,美国休斯公司就研制成功了第一台原始的红宝石脉冲激光测距机,自那时以来,激光测距就成为军事上应用最广而不可缺少的装备了。据美国国防部讲,美军在军用激光中对中低能量(功率)的激光测距/目标指示等方面的投资是近二十年来最为成功的一个项目,由于这些仪器装备的使用,美军的战斗力提高了将近一个数量级。

激光测距已经完全取代了以前的一般光学测距。其基本原理就是测量激光光束从发射到达目标并被反射回来所需要的时间。实际上激光测距就是一具功能简化了的激光雷达。由于激光光束比普通雷达波束窄、脉冲宽度为几毫微秒到几十个毫微秒,所以一般脉冲激光测距机的距离分辨率和测距精度都较普通雷达高。一般军用激光测距机的精度达到了2~5m,精密激光测距甚至可达厘米量级。激光测距的测程,在近地面的范围内由于受大气衰减影响较大,所以一般都低于普通雷达,但是在高空(或深空)及垂直程上的测程就很大了。目前的军用测距机的测程都是几公里到数十公里。激光测距机的重量也由最初的几十公斤减少到只有几百克重(目前的测距望远镜)。

回顾历史,我们可以看出激光测距机大致经历了三个发展阶段,即以红宝石激光测距机为代表的原始阶段,以效率较高的Nd:YAG为光源的并采用硅雪崩二极管为探测器的实用阶段以及最近发展的采用各种人眼安全波段的激光测距机和引入外差接收而同时实现测距、测速甚至成像的多功能观、瞄、测合一系统的第三阶段。这实际上已从单纯的激光测距发展成具有完整雷达功能的激光雷达系统了,这样的系统将作为90年代战场的主要工具。

激光测距的关键是激光光源与探测元件。尽管YAG激光测距机是当前使用最多、技术最为成熟的,但是由于它工作于 $1.06\mu\text{m}$ 波长,对人眼极不安全,而且此波长激光易受大气条件和战场烟尘的影响,因此使用受到了限制。早在70年代人们就提出了“人眼安全”的激光测距概念。在此之后,陆续出现了 $10.6\mu\text{m}$ 波长的 CO_2 , $2.06\mu\text{m}$ 波长的Ho:YLF, $1.73\mu\text{m}$ 的Er:YLF以及Nd:YAG Raman频移 $1.54\mu\text{m}$ 和直到1985年才通过美国陆军使用评价鉴定的 $1.54\mu\text{m}$ 波长钕玻璃激光测距机。就目前技术条件来看,由于 $2.06\mu\text{m}$ 和 $1.73\mu\text{m}$ 波长尚未找到适合测距用的高灵敏探测器,所以发展不快,只有 $10.6\mu\text{m}$ CO_2 及 $1.54\mu\text{m}$ Raman频移和钕玻璃激光测距机最受人们注目,并都已达到了实用化水平。根据表1所列美国Stanag 3606卫生防护标准的规定来看,一般来说, $1.54\mu\text{m}$ 波长的激光测距机是最“安全”的。 CO_2 激光

表 1 Stanag 3606 人眼激光安全标准

激光器	波 长	允许最大曝光量 (J/cm^2)	
		重频 (1Hz)	重频 (10Hz)
红宝石	0.6943	5×10^{-7}	
Nd:YAG	1.06	5×10^{-8}	1.6×10^{-6}
钕玻璃	1.54	1	1×10^{-2}
CO_2	10.6	1×10^{-2}	3×10^{-3}

测距机的每脉冲能量是几十毫焦耳量级,因此按表1的标准来看 CO_2 激光测距机也是“零距离安全”的。但是由于 CO_2 激光测距技术复杂,需要使用上万伏高压(或射频电源)、昂贵的HgCdTe探测器以及专门的红外光学材料等等原因。显而易见,仅就“安全”意义来讲, CO_2 激光测距机的性能价格比是远远不如 $1.54\mu\text{m}$ 激光测距机的。虽然如此,

我们仍然认为 CO_2 激光测距技术具有强大的生命力,它代表了新一代军用激光系统的发展方向,其生命力在于综合考虑未来战场发展需要,以及 CO_2 激光具有的其它激光不足甚至完全不具备的许多优点,归纳起来大致有以下几点:

(1) 它的工作波长与今后战场上广泛使用 $8 \sim 12\mu\text{m}$ 波段的红外热象仪(FILIR)相同,

致使其传输性能、穿透烟雾、雨雾、霾的能力相同,因而两者具有很好的兼容能力。按照美国陆军对激光测距与热象仪之间兼容要求的规定,当热象仪观察到目标的概率为50%时,与其相配的激光测距机发射一次能测到该目标的概率应为99%。显然,其它波长的激光测距机难以满足这一要求。此外,由于波长相同,CO₂激光测距机可以与热象仪共用光学系统、探测器和致冷器,组合成结构紧凑、性能兼容的多功能观、瞄、测合一的光电火控系统。

(2) CO₂激光器(包括波导CO₂激光器与TEA CO₂激光器)的器件效率高,一般都在8%~10%,适合于做成高重复频率的CO₂激光测距机。波导CO₂激光器采用电源调制或电光调Q,其重复频率可达数十千赫至数百千赫,而重频TEA CO₂激光器可达数千赫,混合型TEA器件可达数百赫。由于CO₂激光器效率高、冷却方便,因此高重复频率使用时CO₂激光系统尺寸与重量并不比同样重频的YAG激光器大,而且YAG激光器要做到几百甚至几千赫的重复频率在工程上还有不少实际困难,或者根本不可能。但是未来战场对于跟踪高速低空目标,或者掠地飞行与飞机防撞系统、激光制导系统都要求使用高重频激光器,因此发展高重频CO₂激光测距系统是未来战场的实际需要。

(3) 10.6μm波长CO₂激光有良好的透过大气雾、霾和战场烟雾的能力。虽然我们还没有关于1.54μm波长激光穿透能力的详细数据,但是表2列出了战场烟雾对几种不同波长激光的吸收系数。

表2 战场烟雾对不同波长激光的吸收系数(m²/g)

	可见光	1.06μm	3~5μm	10.6μm	8~12μm
油雾	3.2	3.64	0.36	0.047	0.10
红磷	3.36	1.93	0.29	0.47	0.27
酸雾	3.85	2.19	0.17	0.15	0.23
六氯乙烷	2.38	3.0	0.20	0.79	0.53

根据我们自己在最近用CO₂测距机与YAG及1.54μm测距机比较的结果表明,CO₂激光穿透战场烟雾的能力确实大大优于YAG,与1.54μm波长激光基本相当,或者更好些,与国外关于10.6μm波长通过战场烟雾能力的实验数据^[1]也基本符合。

(4) 一台CO₂激光器可以很方便地实现多条谱线输出,进行选支调谐。如果考虑到同位素CO₂激光器及CO₂激光的序列带跃迁,则CO₂激光波长的选择范围就十分宽阔了,利用这种选支调谐性能进行光学外差通讯,或者大气遥测与战场测毒在未来的90年代战场有很好的应用前景。

(5) CO₂激光波长较长,由于长波长大气湍流的去相干作用较短波长弱得多,例如在强湍流情况下($C_N = 10^{-13} \text{m}^{3/2}$),在10km的水平传输距离上1.06μm的相干接收半径只有10.6μm波长的1/25,约为0.4cm。因此,在水平程近地表面的应用中,长波长极有利于进行外差接收。根据理论计算,如果假定接收都是受散粒噪声限制,则外差接收的探测灵敏度比直接探测灵敏度高8个数量级,实际系统灵敏度也相差 $10^3 \sim 10^4$ 倍。因此对于同样测程的外差探测可以降低发射功率,加之可以进行快速选支及宽范围调谐,因此其保密性、不受干扰性极强。而且因一系统既可以测距同时又可以测速,其测距精度为米级,测速精度也可达到1m/s以下。这些性能是直接探测方式无法比拟的。

基于上述种种优点,我们认为未来的CO₂激光技术在军事上有很大的潜力。当然目前还存在一定的技术困难,但是随着元件技术的发展,CO₂激光系统的体积、重量、可靠性和价格会逐渐改善。例如小型高压电源尺寸已经可以缩小70%,HgCdTe探测器虽然在使用性能和成本上还存在一些问题,但是据有关人士讲:当前CO₂激光探测元件就象十多年前1.06μm硅探测元件一样,随着技术的发展会日趋成熟,现有的各种问题都会得到解决。

二、军用CO₂激光系统的发展概况

军用CO₂激光系统的发展是曲折和漫长的,二十多年来经历了几起几落。早在60年代末期, M. C. Teich就完善了CO₂激光外差接收技术理论^[2],当时大家热心的是外差激光雷达与光通讯系统(大气与深空)。但是由于元器件不成熟,CO₂激光器的可靠性、寿命以及调制、接收等基本元件都没有过关,所以外差CO₂激光技术只能进行一些基础实验研究,并未取得实质性进展。此后,到了70年代初期,由于TEA CO₂激光器^[3,4],以及波导CO₂激光器^[5]的出现并且随着解决了封离式器件的寿命、可靠性、稳频与调谐技术、调制技术、扫描技术与宽带HgCdTe探测器及致冷等技术问题,为军用CO₂激光技术第二阶段的发展奠定了坚实的基础。1974年报导了连续波调频(FM-CW)外差CO₂激光雷达的试验结果^[6],不久以后,1978年RSRE报导了直接探测的脉冲CO₂激光测距机^[7],从此以后在军用CO₂激光技术方面出现了一个发展高潮。在这期间,无论是直接探测,还是外差探测的军用CO₂激光系统,都有了实质性的进展。表3列出了军用CO₂激光技术进展情况。

表3 军用CO₂激光技术进展情况

年 代	进 展 情 况
1964年	实现了CO ₂ 光振荡。
1966年	实现了10.6μm波长CO ₂ 激光外差接收。
1968~1971年	实现了HgCdTe器件的外差混频,进行广泛CO ₂ 外差接收技术的理论研究。
1970~1972年	研制出波导CO ₂ 激光器与TEA CO ₂ 激光器。
1970~1976年	研制成连续波调频外差CO ₂ 激光雷达与脉冲CO ₂ 激光雷达,完成了卫星通讯用波导CO ₂ 激光系统。
1975~1978年	DC波导CO ₂ 激光器达到实用化,实现了射频激励波导CO ₂ 激光器;完成了长寿命封离型TEA CO ₂ 激光器,研制出第一台直接探测的脉冲CO ₂ 激光测距机。研制成CO ₂ 激光目标指示器,开展了CO ₂ 激光雷达工程化的研究工作,使军用CO ₂ 激光技术从实验室走向了工程发展阶段。
1980年	西方多国相继研制出了各种CO ₂ 激光测距机样机并进行了评价试验。
1981年	实现三频外差接收,进行了四波混频原理试验。
1985年	完成TEA CO ₂ 激光测距机的工程发展。
1987年	开始批量生产TEA CO ₂ 激光测距机的前期工作。
1990年以后	CO ₂ 激光测距机列装。

在军用CO₂激光系统中具有代表性的产品有:英国费兰蒂公司的303, 307, 311型直接探测CO₂激光测距机及外差接收的305型CO₂激光测距机^[8], 116型高重频直接探测CO₂激光测距机^[9], RSRE的外差CO₂激光测距仪^[10], 美国GTE西尔凡尼亚公司的精密跟踪系统(PATS系统)^[11], 林肯实验室的火池(Fire Pond)系统^[12], 英国DREV公司的混合型TEA CO₂激光测距机^[13], 法国TPC137型直接探测脉冲式CO₂激光测距机与THC198型外差式脉冲CO₂激光测距机以及美国Texas 仪器公司的激光器/热成像仪组合测距机^[14]

等等。这些CO₂激光系统所采用的激光器包括TEA CO₂激光器、混合型TEA CO₂激光器与波导CO₂激光器;探测方式包括直接探测与外差探测,激光器工作频率从1Hz到100kHz甚至更高。可以认为,目前采用TEA CO₂激光器的低重频CO₂激光测距机与高重频CO₂激光测距机都已完成了工程发展。美国MI-A2坦克将于90年代初期正式装备^[15]。今后的发展方向是研制与红外热象仪全兼容的CO₂激光测距系统。除了直接探测与外差探测的CO₂激光测距以外,军用CO₂激光的其它方面的重点是制导,战场化学遥测(测毒)与CO₂激光雷达。据了解,目前美、英、法、西德等国从事CO₂激光外差探测激光雷达的公司就有十多家,从当前CO₂激光外差接收技术的元器件与单元技术的实际发展水平来看,研制工程型小型化、通用化组件式CO₂外差激光雷达的条件已基本成熟,可能在90年代会有重大进展,因此可以说目前军用CO₂激光雷达已日臻成熟,进入了实用化的发展阶段。

三、关于发展我国军用CO₂激光系统的几点看法

当前,我们国内军用CO₂激光技术的发展已有了一定的基础,其中,小型TEA CO₂激光器、直流与射频激励的波导CO₂激光器、高重频TEA CO₂激光器、混合型TEA CO₂激光器、光栅调谐的小型波导CO₂激光器都已研制成功或通过了鉴定,光伏型HgCdTe探测器已用在国产的CO₂激光测距机上,被动稳频的CO₂激光器的频率稳定度已达到 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 量级,主动稳频用的NH₃D斯塔克池及SF₆饱和吸收池技术也已有报导,同位素CO₂激光器也已研制成功;但是主动稳频CO₂激光器、外差用宽带HgCdTe探测器以及探测器用的致冷技术仍然未见到有实用产品。

在CO₂激光应用方面,CO₂激光多路载波已研制成功,便携式脉冲CO₂激光测距机原理样机已通过了技术鉴定并进行过多次外场试验,调谐波导CO₂激光器也进行了外差试验等等。

总之,国内军用CO₂激光技术在直接探测脉冲CO₂激光测距机研究方面已达到或接近国外80年代初中期水平,但是在CO₂激光外差接收技术研究方面可以说才刚刚起步,正处在初期阶段。为了推动我国军用CO₂激光技术的发展,我们认为:

(1) 在现有直接探测CO₂激光测距机原理样机的研究基础上尽快实现向工程化、实用化方面过渡,力争85期间完成工程化发展工作,同时尽早投入力量开展高重频CO₂激光测距机的研制工作,在高重频CO₂激光测距机的研究工作中尽量利用低重频CO₂激光测距机已取得的成果,其最大测程定为5~10km,重复频率选取30~50Hz为好。

(2) 尽快开展CO₂激光测距机/热象组合兼容系统的研制工作,研制工作的重点是长寿命小型高重频器件(包括催化剂)以及CO₂激光与热象仪探测器共用基片的研制工作(快速高响应度光导型HgCdTe探测器的研究工作)以及同步扫描技术的研究工作。

(3) CO₂激光的最大优势在于外差接收,因此射频波导的CW外差与混合型TEA CO₂激光器脉冲外差的工作应同步进行,以适应今后不同应用场合的需要。为此,必须重视适合工程使用的稳频射频激励波导CO₂激光器及混合式TEA CO₂激光器、调谐技术、稳频技术以及数百兆赫带宽的高频HgCdTe器件的研制工作。力争85期间在外差接收技术方面能有重大突破,研制出原理性外差测距、测速样机,为95期间CO₂激光雷达的整机研制奠定技术基础。

(4) 注意发展军用CO₂激光系统的相关技术,例如,致冷技术,CO₂催化再生技术,高

重频、长寿命快速高压开关技术、光束调制与解调技术以及光束扫描技术等。

参 考 文 献

- [1] Thomas C R, Chynoweth P J. CO₂ TEA laser for military applications. GFC Avionics Ltd, 1984
- [2] Teich M C. Proc IEEE, 1968; 51: 371
- [3] Dumanchin R, Roeca-Serra J. C R Acad Sci, 1969; 269B: 916
- [4] Benulieu A J. A P L, 1970; 16: 504
- [5] Bridges T J, Burkhardt E G, Smith P W. A P L, 1972; 20: 403
- [6] Fraunfelder M F. AD/A-005865, dec, 1974
- [7] Taylor M J, Davies P H, Brown D W *et al.* Appl Opt, 1978; 17(6): 885
- [8] Woods W F, Malcolm D A. Military electronics device expo' 80, Conference Proceeding, 1980
- [9] Woods W F. SPIE, 1986; 806: 122
- [10] Halme K F. Opt & Quant Electron, 1981; 13(1): 35
- [11] SPIE Proc, 1978; 134
- [12] Sullivan L I. SPIE Proc, 1978; 277: 148
- [13] Cruickshank J M. Appl Opt, 1979; 18: 290
- [14] Patrickshank T R. Appl Opt, 1979; 18: 290
- [15] Patrick L R. USP 4,561,775, 1985

作者简介: 封鸿洲, 男, 1938年9月出生。高级工程师。现从事激光技术专业工作。

收稿日期: 1992年7月20日。

· 简 讯 ·

发射11fs脉冲的掺钛蓝宝石激光器

美国光学学会年会收到的邮寄截止日期后来自美国华盛顿州立大学 M · Murnane 和 H · Kapteyn 指导的研究小组的报告 (PD 17), 报导他们用自锁模掺钛蓝宝石激光器获得了飞秒脉冲。在他们研究的系统中, 腔内色散补偿实现了最佳化——该系统由一根4mm掺钛蓝宝石晶体、10cm聚焦镜和一对51.5cm分离的石英棱镜组成——可发射平均能量为0.5W的10.9 fs脉冲, 由一台5W的氩离子激光器泵浦。据 Murnane 说, 美国华盛顿州立大学研究小组以前曾采用Schott LAFN 28型玻璃棱镜、3cm长掺钛蓝宝石晶体和LAKL 21型玻璃棱镜、9mm长掺钛蓝宝石晶体, 分别获得了32fs和17fs脉冲。

锁模掺钛蓝宝石的理论增益极限在10fs之内。在美国华盛顿州立大学对最佳棱镜和膜层正继续进行研究, 将增加780nm中的61.8nm短脉冲的带宽。

译自 L F World, 1992; 28(11): 11 于祖兰 译 巩马理 校