

激光器相控阵列的光束合成

胡志平 宋如华 杨大让 乐时晓

(电子科技大学应用物理所, 成都)

摘要: 应用单个小功率激光器, 采用相控阵列结构, 可以获得很大功率的激光输出。本文对近年来这一领域的理论和实验研究作了综述。

Beam combination by a phased lasers array

Hu Zhiping, Song Ruhua, Yang Darang, Le Shixiao

(Institute of Applied Physics, University of Electronic Science and Technology of China)

Abstract: A phased laser array system associated with many lower-power lasers can give a high power laser beam. The progress of the theory and experiment technique of the phased laser array is summarized.

一、引言

随着人们对高功率半导体激光器的需要, 以及半导体工艺技术的不断发展, 半导体激光器的相控阵列技术已得到了广泛的发展^[1], 商业化的半导体激光器相控阵列也已出现^[2]。近年来, 随着美国战略防御倡议计划的提出, 人们对利用激光器的相控阵列技术获得高功率激光输出寄予了厚望^[3]。

激光器相控阵列系统由一组频率和相位完全匹配的激光器组成, 其输出光束在远场实现相干合成, 使得整个系统就象一个单一的相干光源。即使阵列中的单个激光器的功率不是很高, 在远场也可望获得相当高的峰值光强。同时, 因制造这种低功率激光器的技术是相当成熟的, 因此, 不会有研制非常高功率激光器所遇到的许多问题, 例如光学元件的加工, 介质的不均匀性, 强激光的输出等。这种系统可望应用在地基或空基激光武器系统中。

目前, 激光器阵列系统一般采用图1所示的主振荡器功率放大(MOPA)结构^[4]。由主振荡器输出的光束经过分束元件后, 输入到多个功率放大器进行放大。由于噪声的存在(主要是放大介质密度的涨落), 不同放大器的涨落是互不相关的, 且各束光通过不同光束通道传输也会带来相位误差, 导致光束之间的相干性变差, 使合成光束的峰值光强减小。因此, 一个激光器相控阵列系统能否实现光束的

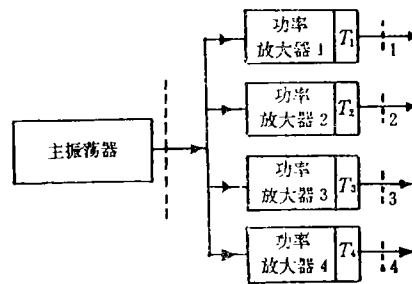


图1 MOPA结构示意图

相干合成, 关键取决于我们对阵列中各个激光器的频率锁定和保证各光束之间的相位匹配的能力。

当前国外正在研制的主要有两类激光器相控阵列系统。其中一类是借助于光电探测、自适应光学等光电伺服技术来实现各光束之间的相位匹配, 我们记这一类为A型MOPA; 另一类是利用非线性光学相位共轭技术来实现光束间的相位匹配, 记为B型MOPA。本文将主要介绍这两类系统的研究和发展状况。

二、A型MOPA系统

早在70年代, 人们就曾对高功率HF/DF激光器 ($P > 10\text{MW}$) 的功率提取问题进行过研究。早期的研究发现, 要获得较高的功率输出, 必须对激光器进行特殊的设计, 例如让功率有效地分布在多条谱线上。但由此使得各条谱线的波阵面相位难以保持一致, 因而提出了用自适应技术及传感元件来控制不同谱线之间的位相。同时, 出现了两种提取功率的方式: 环形非稳腔激光输出^[5,6]及主振荡器功率放大(MOPA)两种方法。实际研究发现, 前者具有能有效提取功率且结构紧凑等优点, 但至少在下述三个方面不及MOPA。(1)对失调十分灵敏;(2)难以测量及控制模的质量;(3)存在谱线的跳变及模式间的竞争和反常色散效应等, 因而, 近年来人们对MOPA进行了一些研究。A.W. Angelbeck等^[7]提出了一种可调MOPA单谱线化学激光器及其平行光学级联主振荡功率放大器(POSW)。Warren用多谱线化学激光器发展了上述方法, 但上述方法在克服了前面的三个缺点的同时, 仍难以实现各束光的相干及多谱线光束的波前重组。为此, C.P. Wang^[8]提出了一种利用主振荡器和子

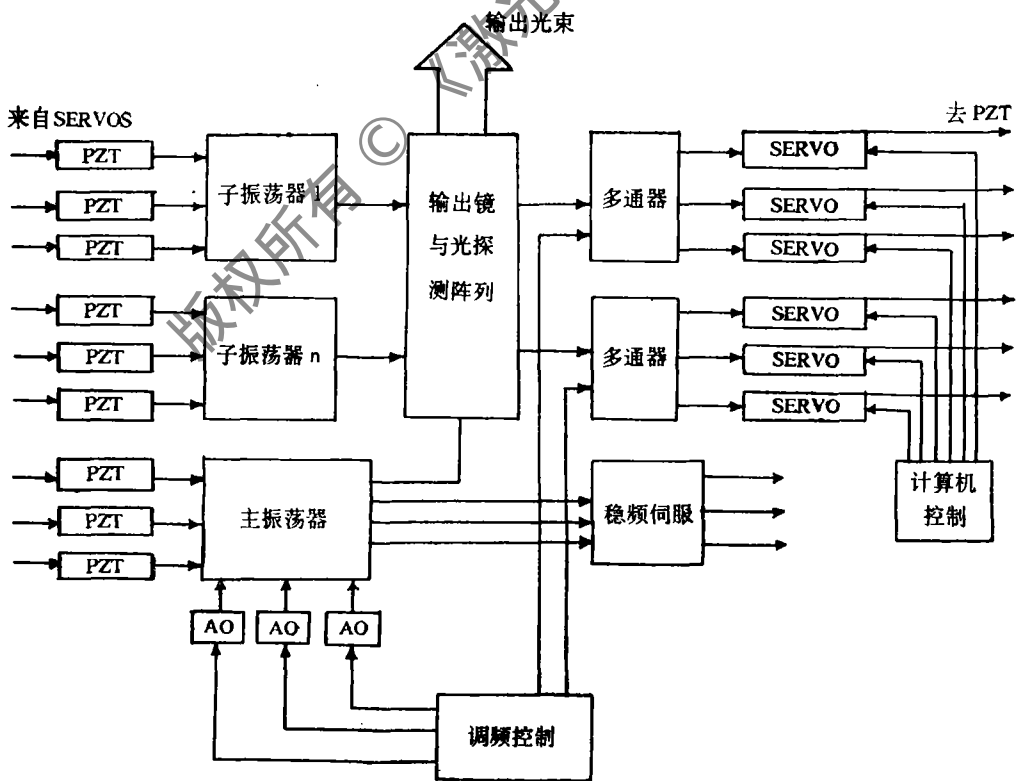


图2 MOSOA系统方框图

振荡器阵列 (MASOA) 实现相位控制和光束合成的新方法。该方法能有效地实现相干光束波阵面的重组、光束控制及聚焦, 该方案的框图如图2所示。

整个装置分: 主振荡器、子振荡器、相干组合系统、相位锁定系统及总体执行系统五个部分。其中主振荡器提供一束功率相对较低且包含三个波长的参考光束, 该光束再去激励各子振荡器。主振荡器出来的三条谱线分别用不同的声光调制器 (AD) 用不同的调制频率进行调制 (便于外差检测), 并且利用伺服系统及PZT对三条谱线的相位进行精确控制。各子振荡器在主振荡器入射光的激励下, 通过增益介质的光放大, 再利用伺服系统和PZT使其与主振荡器相位相同, 然后通过各子振荡器的公共输出镜输出具有同相位的光束。伺服系统装置则是: 从光电探测器中所获得的电信号经多路分束传输线 (利用AD调制频率的不同进行分束), 经由计算机控制的相位探测器和相移器, 最后, 将信号放大后用 PZT 控制及调整光束的相位 (见图3)。

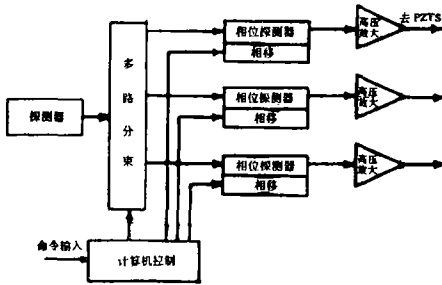


图3 典型相位锁定方框图

此外, C.P.Wang^[10]等还设计了一种相位锁定HF化学激光器的伺服系统。该系统能精确测定各光束的稳定相位差值, 以实现波前重组, 其伺服系统方框图如图4所示。

近年来, J.M.Bernard等^[10]利用MOPA概念实现了两个连续波 HF 激光器的相位锁定。相应的主振荡器功率放大实验装置及相位阵列装置如图5所示。每个 HF 主振荡激光器

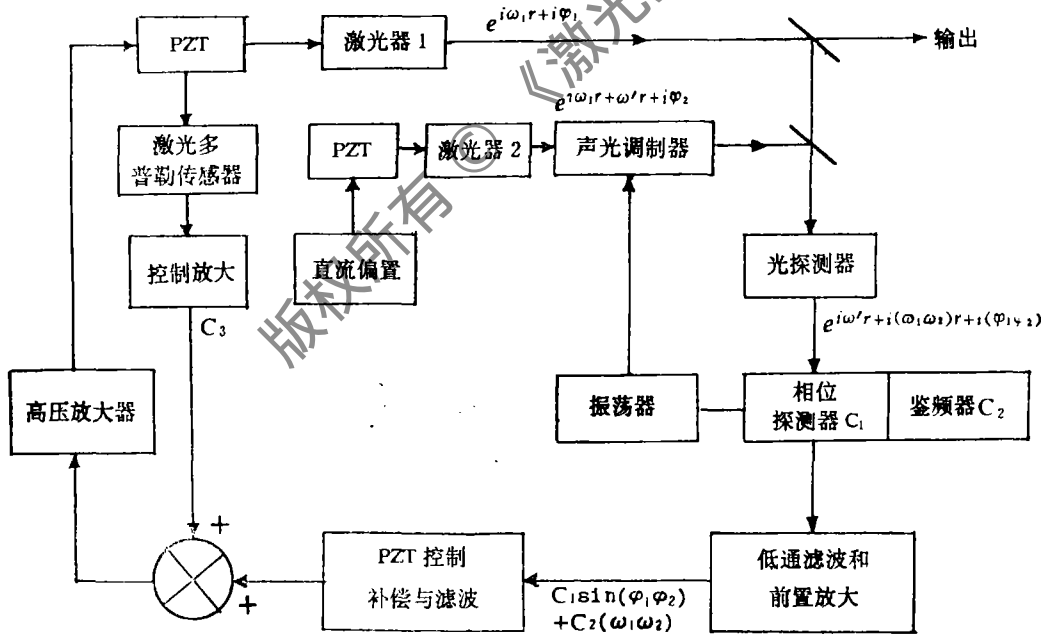


图4 伺服系统的物理部件

输出功率是3W, 经功率放大后, 每束光的功率达到6W。利用测量干涉条纹可见度的方法, 测得这两束放大后的光束的相干性大约是90%。实验中发现, 在远场相干合成的光场亮度可达到接近于单束光亮度的4倍, 但由于光束相干合成的亮度对两束光的光程差非常敏感, 所

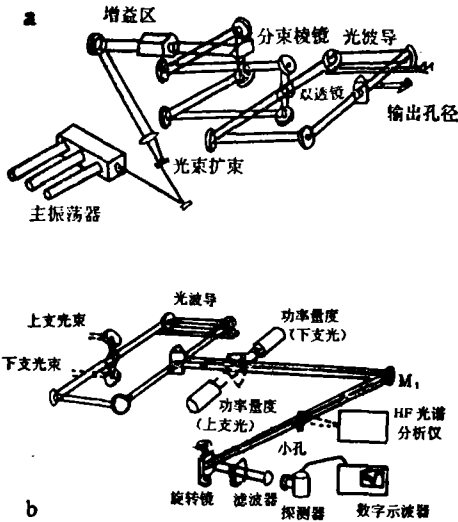


图 5

a—带放大器的主振荡器结构装置图
b—相控阵列系统结构图

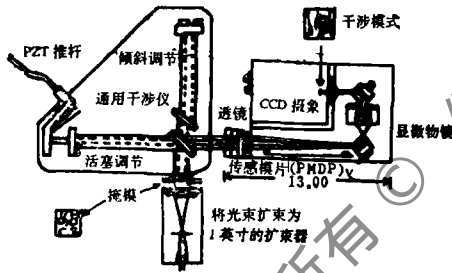


图 6 光路结构图

系统的传感器及相应的控制系统也是实现该技术的重要环节。

三、B型MOPA系统

A型MOPA系统发展较为成熟，研究工作比较深入，而B型MOPA系统是近年才发展起来的一种很有应用前景的系统。不同于A型MOPA系统，B型MOPA系统是利用非线性光学相位共轭技术，来补偿相位畸变，实现光束间的相位匹配。

美国TRW公司有一个专门研制激光器相控阵列系统 (PALS) 的计划。图7就是该公司向美国SDIO提供的一份最终报告中，提出的空基PALS系统结构框图^[17]。

1988年，TRW公司的G.J.Linford等人^[18]研制了一个实用化的高能激光器相控阵列

以一般情况下测得的光束合成的亮度仅仅只是单束光亮度的2.5倍。

类似于MOPA，Janet S.Fender 等人^[11]发展了“光学相控望远镜阵列 (OPTA)”技术。该技术早期是借鉴于无线电中的综合雷达孔径概念，主要用于天文望远镜，但不久人们意识到其对于高能激光束的合成是完全可用的，因而近年来受到了有关各方的重视^[12,13]。该技术的关键是实现各合成子系统相位的精确测量和控制，在美国，这一技术已趋成熟并已取得专利^[14]。其中在位相测量方面，R.A.Carreras等^[15]曾报导美国空军武器实验室所进行的相控阵列实验结果：利用标准具已能监测到 $\lambda/100$ 的光程差，并采用 Ar^+ 激光的多条谱线能精确地确定波阵面的绝对相位。进行实验的装置如图6所示。其相位平移闭环带宽130Hz，精度 $\lambda/15$ ；倾斜控制带宽950Hz，精度40nrad。这一实验是第一次实现发射光学相控阵。利用这套装置还可实现光束快速转向，转向范围100 μ rad，带宽250Hz，残余波前误差 $\lambda/10$ 。

此外，还必须为确定并控制各子系统的相位提供一种参考光束，D.E.Elerath^[16]曾提出过三种不同的相位参考方案，即：遥感参考、固定参考和浮动参考。还有，连接各子系

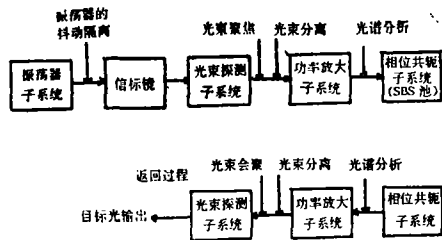


图 7 PALS框图

系统，图8是该系统原理示意图。该系统主要由三个子系统组成：

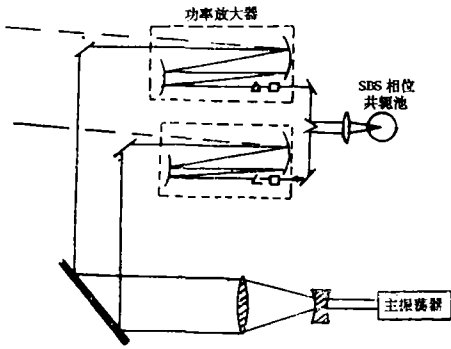


图8 系统原理图

1. 主振荡器子系统

主振荡器子系统的主要作用是提供一束线偏振的、光束质量非常好的较低功率的参考光束，输入到功率放大器。主振荡器输出光束的频谱必须和功率放大器的增益介质相匹配，以获得良好的放大效果。

2. 功率放大器子系统

功率放大器子系统的主要作用是对来自主振荡器的输出光束进行多次放大，以获得高功率激光输出。

3. 相位共轭子系统

本系统中的相位共轭子系统采用的是SBS相位共轭池，其主要作用是保证经SBS相位共轭池反射出来的各束光实现频率和相位的匹配。为了实现这一点，该系统让各束光共同聚焦进入SBS相位共轭池，此时，经SBS相位共轭池反射出来的各束光，不仅实现了相位共轭，且保证了各束光之间相位匹配^[19]。

图9是G.J.Linford等人研制的高能激光器相控阵列系统示意图。

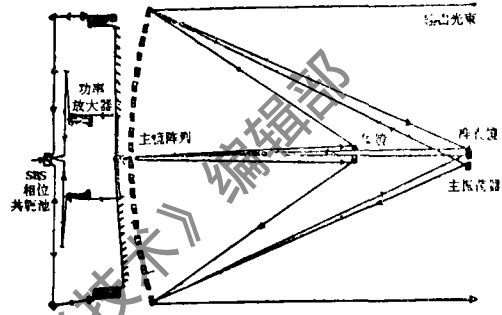


图9 高能激光器相控阵列系统示意图

四、结束语

除了前述的两种类型的激光器阵列系统之外，利用激光谐振腔之间的相互耦合也可以实现光束的相干合成。图10就是G.E.Palma和W.J.Fander给出的，利用两个CO₂激光器的谐振腔的耦合，来实现光束相干合成的实验系统示意图。

此外，利用光束的衍射特性，也可以实现相干合成。S.Desilvestri等人^[21]给出了图11所示的实验系统图。在Nd:YAG激光器的腔内插入一片多孔掩膜，当孔之间的间隔较大时，通过不同孔输出的光束互不相干，但当孔间间隔小到一定程度时，由于光束的衍射耦合效应，通过不同孔的光束在远场可实现相干合成。

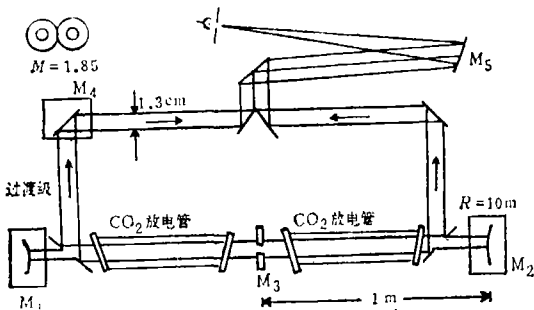


图10 谐振腔耦合实验系统示意图

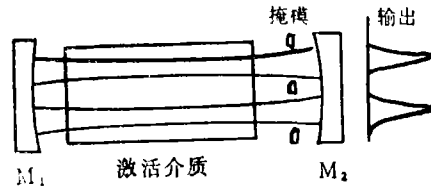


图11 掩膜相干合成实验原理图

总之，激光器相控阵列作为一个非常活跃的研究领域，日益引起人们的重视和关注，并

开展了大量的理论和实验研究工作。但迄今为止,已实现商业化,并得到应用的只有半导体激光器锁相阵列,其它类型的激光器相控阵列尚处于实验室研究阶段,有待于进一步开展这方面的研究工作。目前,已实现了数十个半导体激光器的锁相,锁相阵列的连续输出功率可达1~10W。

参 考 文 献

- [1] Scifres D R, Burnham R D, Streifer W. A P L, 1978, 33(12):1015
- [2] Streifer W, Burnham R D, Paoli T L *et al.* Laser Focus, 1984, 20(6):100
- [3] Fender J S. Synthetic aperture systems. Proc SPIE, California, 1983, Washington:SPIE, 1983, 440
- [4] Shellan J B. J O S A(A), 1985, 2(4):555
- [5] Casperson I W, Shekhani M S. Appl Opt, 1975, 14(12):2653
- [6] Chodzko R A, Mason S B, Cross E F. Appl Opt, 1976, 15(11):2137
- [7] Angelbeck A W. AFWL-TR-74-256, 1975
- [8] Wang C P. Appl Opt, 1978, 17(1):83
- [9] Wang C P, Smith P L. Appl Opt, 1979, 18(9):1322
- [10] Bernard J M. Appl Opt, 1989, 28(21):4543
- [11] Fender J S, Carreras R A. Opt Engng, 1988, 27(9):706
- [12] Butts R R, Cusumano S J, Fender J S *et al.* Opt Engng, 1987, 26(6):553
- [13] Jordan D H, Morrow D R, Goranson R W. Control loop sensor for an optical synthetic aperture. In: Fender J S. Synthetic aperture systems, Proc SPIE, California, 1983, Washington:SPIE, 1983, 440:109
- [14] Fender J S, Mex A, Cusumano S J *et al.* Optically phased laser transmitter. GOIJ 1/20, GOIB 9/02, USP 4639586, 1987
- [15] Carreas R A, Cusumano S J, Andrews M G *et al.* Overview of a phased array experiment. In: Fender J S. Synthetic aperture systems, Proc SPIE, California, 1983, Washington:SPIE, 1983, 440:168
- [16] Elerath D E. Synthetic aperture beam control systems. In: Fender J S. Synthetic aperture systems, Proc SPIE, California, 1983, Washington:SPIE, 1983, 440:8
- [17] Schnurr A D. Phased array laser system. AD-A169635, Washington: TRW Company, 1988
- [18] Linford G J. Phased array combination of laser beams. HOIS 3/23, HOIS 3/30, USP 4794345, 1988
- [19] Valley M, Lombardi G, Aprahamian R. J O S A(B), 1986, 3(10):1492
- [20] Palma G E, Fader W J. Coupled resonator beam combining. In: Fender

固体激光材料研究的进展

胡玉芳

(光明器材厂, 成都)

摘要: 本文评述了近期固体激光材料在高平均功率、高效率、可调谐、多波长等方面研究的进展。

Recent advances in solid-state laser materials

Hu Yufang

(Guangming Materials Plant)

Abstract: The recent developments of solid-state laser materials in the respects of high average power, high efficiency, tunable characteristics and multiple wavelengths are reviewed and discussed.

一、引 言

固体激光材料作为激光器的工作物质, 它的优劣直接影响到固体激光器的发展。因此, 从1960年红宝石激光器问世以后, 在材料科学领域里, 人们就广泛地开展了固体激光材料基质、激活离子、敏化离子等方面的研究和探索工作。在最初几年里, 人们实现了一系列掺入稀土离子晶体和钕玻璃激光振荡, 并从中获得实用价值很高的 Nd:YAG 晶体, 使固体激光器得以迅速发展, 相继制成了连续调Q、锁模等固体激光器件。

但是, 固体激光器存在着工作效率低、频率单一的缺点, 并且输入能量大多以热的形式耗散, 不仅对激光器冷却提出相当高的要求, 而且在棒内产生热畸变, 降低了激光束质量, 限制了最高平均功率输出, 严重妨碍了固体激光器往高平均功率方向进一步发展。虽然人们试图通过在晶体中添加敏化剂来提高器件的效率, 但效果不十分明显, 所以, 在以后近十年里, 固体激光器进展缓慢。

然而, 到了80年代, 随着板条固体激光器、二极管泵浦技术和可调谐晶体研究的发展, 使固体激光器的研究工作获得了显著进展。目前固体激光器已在材料加工、激光医学等方面得到广泛的应用, 并且以提高固体激光器的平均功率、工作效率、开拓新波段和波长可调为目的, 固体激光材料的研究仍十分活跃。

J S. Synthetic aperture systems, Proc SPIE, California, 1983, Washington:SPIE, 1983, 440:153

[21] Desilvestri S, Laporta P, Maghi V *et al.* A P L, 1987; 51 (22): 1771

收稿日期: 1990年9月3日。收到修改稿日期: 1990年10月23日。