连续分振幅式高功率准分子激光角多路编码光路设计

胡 云[1,2],王大辉[1],赵学庆[1]

(1. 西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室,陕西 西安 710024;
2.中国工程物理研究院激光聚变中心,四川 绵阳 621900)

摘 要:在高功率准分子激光系统中,一般采用光学角多路技术来获得高能量窄脉冲输出。文中介绍了角多路技术原理,提出了一种采用矩形阵列和空间层叠光路结构的连续分振幅两次编码方式,并针对该实验室的 XeCl 高功率准分子激光系统进行了具体的编码光路设计,给出了设计实例。该方法具有编码结构紧凑,编码精度高,与光路准直、激光参数测量系统等兼容性好,便于加工制作和安装调节等优点,目前已在系统中应用,效果良好。

关键词:激光光学; 准分子激光; 角多路技术; 编码

中图分类号:TN248.2 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201645.0606001

Sequential amplitude divided angular multiplexing encoding optical system design for high power excimer laser system

Hu Yun[1,2], Wang Dahui[1], Zhao Xueqing[1]

(1. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi′an 710024, China;
2. Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: In high power excimer laser system, angular multiplexing technique is employed to achieve both high energy and narrow pulse output. In this article, angular multiplexing technique was introduced, and a multiplexing encoding method was presented. This method encoded seed beam in two steps by sequential amplitude splitting. The optical elements were arranged in rectangle arrays and piled by layers. A specific optical design was made for XeCl high power excimer laser system in this laboratory. This method of angular multiplexing encoding has advantages of compacted space, small encoding error, good compatibility with alignment and measurement, and is also easy to fabricate and assemble. This design is adopted in the system and performs well.

Key words: laser optics; excimer laser; angular multiplexing technique; encoding

收稿日期:2015-10-05; **修订日期**:2015-11-15

基金项目:激光与物质相互作用国家重点实验室基金项目(SKLLIM1105)

作者简介:胡云(1983—),男,助理研究员,博士,主要从事激光技术及等离子体物理研究。Email: huyun@mail.ustc.edu.cn

0 引 言

在高功率准分子激光系统中,由于放大介质上能态储能时间很短,必须连续补充瞬态储能才能获得高能量输出,所以一般电子束泵浦准分子激光放大器都采用长脉冲泵浦技术,增益时间可长达 200 ns。同时为了同时获得高功率输出,则需要进行短脉冲放大。但由于种子光脉宽和放大器增益宽度不匹配, 只能提取出很小一部分能量,这两个需求产生了矛盾。虽然设计出高功率短脉冲准分子激光器也是可能的,但那样对激光系统器件性能要求非常高, 不便于生产制造。为持续提取出放大器中的储能并实现短脉宽放大输出, 系统中通常采用光学角多路编码解码技术[1-8]。

光学角多路技术一般包括编码光路、传输放大光路和解码光路等几部分[1-8]。其中编码光路主要功能是将短脉冲种子光信号构造成为一个表观长脉冲序列,总长度与放大器增益长度匹配,各子脉冲进行角编码,然后通过传输放大光路进入下一级放大器进行放大。通过这样的方式可以显著提高激光放大器中的占空比,实现激光脉冲信号的有效放大,提高能量提取效率。典型的准分子激光装置如美国的 NIKE 和中国的天光一号等均采用了该技术[2-6]。NIKE 装置主要采用了分波前的编码方式; 天光一号采用了分振幅的编码方式,但光束较少。针对笔者所在实验室包含较多子束的 XeCl 高功率激光系统,文中提出了一种采用矩形阵列排布、空间层叠式光路结构和两次分振幅编码方式,进行了光路设计。该方法可方便的完成角多路中激光脉冲的编码功能, 同时与系统光束平滑、自动准直等功能兼容性好,各子层间结构相似但空间上相互独立, 对光学元件及支撑结构无特殊要求,便于工程实施。另外该光路系统编码精度高,设计误差小,调试也较为方便。

1 角多路技术原理

图 1 为角多路技术示意图[1,3-4]。角多路技术光路结构主要包括编码光路系统、传输放大和解码光路系统等几个部分。由前端激光器产生的脉宽为 Δt 短脉冲种子光, 经过编码成为 M 束等光强的脉冲串, 相邻脉冲之间延时为 Δt。设放大器增益时间长度为 T,那么有 $M\cdot\Delta t\approx T$。光束较多的时候往往要经过两次编码,第一次编码成为 M 路光束,第二次编码成为 N 路光束。编码完成后,所有激光脉冲构成表观上的长脉冲,脉冲宽度与放大器增益长度匹配,大大提高了占空比。编码后的光束进入激光放大器中传输放大, 进行能量提取。在进入传输放大光路之前,各光束还需进行角编码,即各光束在空间上以不同的角度进入放大器, 以保证光束在放大器空间上的填充率。放大后的脉冲序列由匹配光路进入解码光路。解码光路通过消延迟光学结构,使每一个激光脉冲精确同步,并最终到达靶面,合成为一个脉冲,在靶面获得较高的激光功率密度, 完成窄脉冲激光放大。

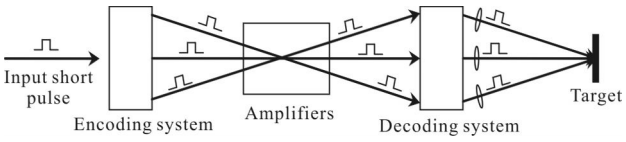

图 1 角多路技术示意图

Fig.1 Diagram of angular multiplexing technique

2 连续分振幅式角多路编码光路设计

在高功率准分子激光角多路 MOPA 系统设计过程中, 提出了一种连续分振幅式空间层叠矩形阵列式角多路编码光路结构。其中光束空间排布方式均统一采用矩形阵列式排布, 或沿某方向的投影为矩形阵列, 空间结构可视作相似光路结构在竖直方向上的复制和层叠。该结构比较简明,对光学元件及支撑结构无特殊要求,便于加工制造。该光路结构便于在有限空间实现较多光束的编码, 结构紧凑编码误差较小,精度较高。

该编码光路的设计思路如图 2 所示。设系统中前端种子光脉冲半高宽约为 Δt, 放大器均为长脉冲准分子激光放大器,增益宽度为 T。短脉冲种子光首先通过第一次编码光路成为 m 路光束, 相邻两束之间延时为 Δt。编码光路中采用 m 个分束镜进行连续分振幅式分束以形成 m 路子光束, 分束镜反射率分别为 $1/m$、$2/m\cdots m/m=1$。按时间延迟先后将这 m 束激光排序,分别为 1~m 路激光。编码后的 m 路激光可进入激光放大器传输放大,以提高能量水平,有利于进行第二次编码。进入第二次编码时首先调整光

束排布，将 m 束激光在空间上竖直层叠，从上到下分别为 1~m 路激光。将 m 束光束中每一束编码成为 n 束，第二次编码后共输出 $m\times n$ 束激光。第二次编码分为两步进行，第一步先将 m 束激光进行时间延迟，相邻两束延迟时间为 $n\Delta t$。延迟后的 m 路光束进入第二步，每一路通过 n 个分束镜进行分束，产生等光强的 n 个子光束，并在水平方向上排列成为一层。分束镜的反射率分别为 $1/n$、$2/n$、$3/n\cdots n/n=1$。同层相邻子光束间延迟时间为 Δt，相当于空间距离 $3\Delta t/10$ m。竖直排列的 m 束入射激光共产生 m 层共 $m\times n$ 个子束，这些子束在空间上排列成为 $m\times n$ 的矩形阵列。反射镜均采用 45°反射的形式，每一组反射镜在南北方向或东西方向的投影均为矩形阵列。

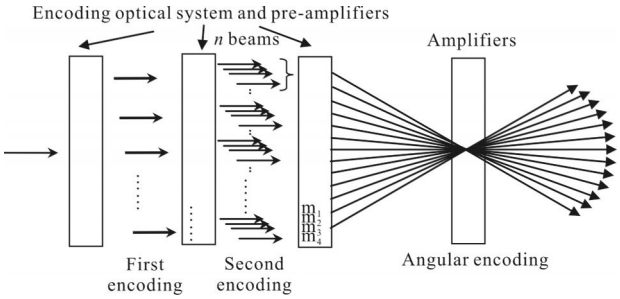

图 2 编码光路设计思路

Fig.2 Illustration of encoding system optical design

3 角多路编码光路结构设计实例

根据第二节中提出的思路和原则设计了一种适合高功率准分子激光系统 MOPA 系统的编码光路。设系统前端种子光脉宽为 Δt=10 ns，放大器增益宽度 T~200 ns。拟通过编码光路系统将短脉冲种子光编码成为包含 18 个子束的表观长脉冲，相邻两束时间间隔为 10 ns，时间上共占据 180 ns，与放大器增益宽度基本匹配。编码过程通过一次编码和二次编码分两步完成。种子光经一次编码成为 m=3 路，再经二次编码成为 $m\times n$=3×6=18 路。编码形成 18 个子束后再进行角编码。

3.1 一次编码

一次编码光路结构位于预放大器 AMP1 之后，如图 3 所示。表 1 给出了各光学元件的参数。从反射镜 MEf11 开始，至由 MEf12、MEf24 和 MEf34 组成的反射镜阵列 M21 结束，通过分束镜以连续分振幅的方式形成 3 个子束。入射激光在分束镜 MEf11 的透射束为第一束，不经过延迟光路，直接入射至 M21。设入射光强为 I，则透射束光强为 $I/3$，反射束为$2I/3$。分束镜 MEf21 的反射束为第二束，反射系数 1/2，反射光强 $I/3$。第二束延迟距离为 $2L$=3 m，延迟时间 10 ns。MEf21 透射束为第三束，透射光强 $I/3$。第三束激光相对于第一束延迟共 $4L$=6 m，延迟时间 20 ns。

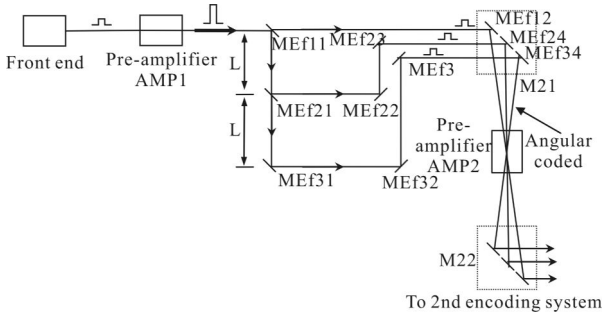

图 3 一次编码光路结构

Fig.3 First encoding optical layout

表 1 一次编码光路反射镜阵列

Tab.1 Mirror arrays used in first encoding system

Mirror array	Beam arrangement	Reflectivity	Function
MEf11	Single	45°2/3R	Injection, 1st beam splitter
MEf21	Single	45°1/2R	2nd beam splitter
MEf22, MEf23	Single	45°HR	2nd beam reflector
MEf31-33	Single	45°HR	3rd beam reflector
M21	1×3	45°HR	First encoding output

3.2 二次编码

一次编码后的三束激光经过预放大器 AMP2 的放大后进入二次编码光路结构，如图 4 所示。图 5 给出了反射阵列的排布示意图，表 2 中为各反射阵列的参数。二次编码从反射镜阵列 MESDmi(i=2,3;i=1~4)开始，至反射镜阵列 MES_out 结束，分为两步进行：第一步，将 m=3 束激光在竖直方向上层叠，构造延迟光路使得三束激光间产生延迟 $n\Delta t$=6×10=60 ns。第二步，每一层激光通过连续分振幅的方式产生 n=6 个子束。

第一步，层间延迟。m=3 束激光经延迟后入射于 3×1 阵列 MES_in 并在竖直方向上层叠。3 束激光在第二步中将分别成为 3 层光束，故这 3 束光束间的延迟也就是层与层之间的延迟。第一束不延迟，直接入射于 MES_in。第二束通过反射镜 MESD21~MESD24

构成的延迟光路,相对于第一束共延迟 60 ns,延迟距离为 15 m(考虑到第一次编码后已存在的 10 ns 延迟)。第三束通过反射镜 MESD31~MESD34 构成的延迟光路,相对于第二束延迟 60 ns,延迟距离为 15 m(同样考虑到已存在的 10 ns 延迟)。

第二步,层内延迟。从反射镜阵列 MES_in 开始至反射镜阵列 MES_out 结束。对每一层,从 MES_in 入射,由 MES11 至 MES61 的分束镜阵列采用连续分振幅的方式成为 6 束激光。分束镜位于 MES_in 和 MES66 的连线上,反射系数分别为 1/6、1/3、1/2、2/3、5/6 和高反镜,子束光强均为入射光强的 1/6。第一子束通过 MES11~MES12 入射至 MES_out,第二子束通过 MES21 和 MES22 入射至 MES_out,以此类推。其中后一子束相对于前一子束在水平方向上错开一个反射镜的距离 Δx,在竖直方向上增加 $2L+\Delta x=3$ m 延迟,对应 10 ns 时间延迟。这样,MES_in 上每一入射光束,经过分束编码后形成一层共 6 个子光束,每一层出射于反射镜阵列 MES_out 上的一层,3 个入射光束共形成 3 层子光束共 18 束,按延迟时间序列重新编号为 1~18 路激光,它们在 MES_out 上形成 3×6 阵列。至此,18 路激光时间编码已全部完成,它们在时间上构成表观上的长脉冲。

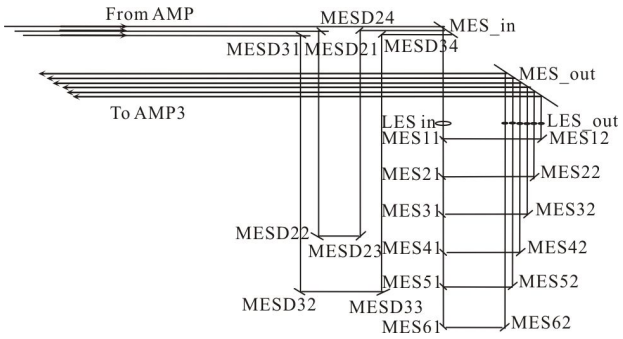

图 4 二次编码光路示意图

Fig.4 Illustration of second encoding system optical layout

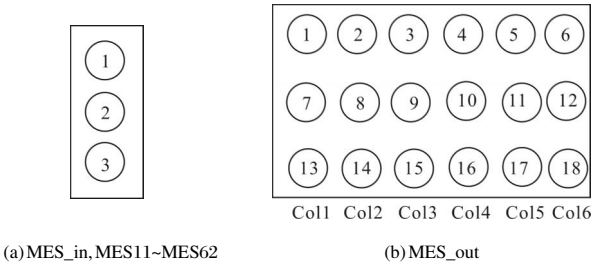

图 5 编码光路光束排布

Fig.5 Beam arrangement of multiplexing encoding system

表 2 二次编码光路反射镜阵列

Tab.2 Mirror arrays used in the second encoding system

Mirror array	Beam arrangement	Reflectivity	Function
MESD*mi*(*m*=2,3;*i*=1-4)	Single	45°HR	*i*-th layer delay
MES_in	3×1	45°HR	Second encoding 3 to 18 injection
MESn1(*n*=1-6)	3×1	45°*n*/6 R	*n*-th column splitter
MESn2(*n*=1-6)	3×1	45°HR	*n*-th column reflector
MES_out	3×6	45°HR	Second encoding output

3.3 角编码

经过时间编码后的 18 路光束形成表观长脉冲,脉宽与放大器增益宽度匹配,提高了时间占空比。接下来还需进行角编码,与下一级放大器匹配,以提高放大器的空间填充率。角编码的原则是光束紧凑排列,减少不必要的光束间的空隙及重叠,然后考虑到与时间编码的匹配和放大器增益区截面的匹配,使得光束截面能够尽量充满放大器的增益区的截面,获得最大的能量提取。

一种可能的角编码情况如图 6 所示。图 6(a)是一种可能的光束排列情况。为了与编码输出光束阵列排布良好的匹配,光束排布采用了 4-5-5-4 的阵列排布。这样两者之间匹配时光束之间位置调整比较小。最外面两层光束接近于最密堆积,而中间两层保持原来的排布方式。对放大器来说,以该光束阵列排布入射较为紧凑。设放大器增益区直径为 D,长度为 L 的圆柱,光斑直径为 d,粗略估算该角编码方式的空间填充率约为 60%。若能采用更为紧密的光束排布方式,填充率会提高,但那样对反射镜阵列的加

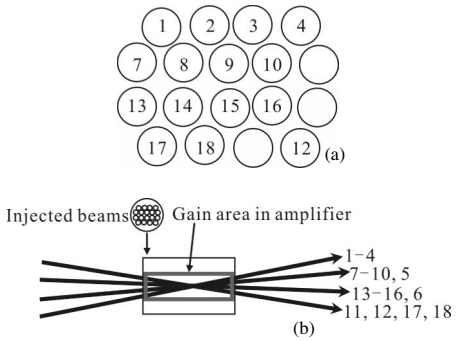

图 6 角编码示意图

Fig.6 Illustration of angular encoding

工制作及光路调试要求将更高。

4 结 论

文中介绍了角多路技术原理,提出了一种采用矩形阵列、空间层叠的编码光路结构。针对高功率准分子激光 MOPA 系统进行了具体的编码光路设计,包括一次编码,二次编码以及角编码光路结构。该解码方法具有编码误差小,精度高,兼容性好,便于加工制作和组建等优点, 目前已在系统中采用,效果良好。

参考文献:

[1] Lehmberg R H, Obenschain S P, Schmitt A J. Baseline design of a 5-7 kJ KrF laser facility for direct illumination ICF experiments [R]. Washington D C: Naval Research Laboratory, 1985.

[2] Owadano Y. Performance of the ASHURA KrF laser system and its upgrading plan[J]. ***Laser And Particle Beams***, 1993, 11(2): 347-351.

[3] Shaw M J, Edwards B, Hirst G J. Development of high performance KrF and Raman laser facilities for inertial confinement fusion and other applications [J]. ***Laser And Particle Beams***, 1993, 11(2): 331-346.

[4] Obenschain S P. The nike KrF laser facility: Performance and initial experiments[J]. ***Phys Plasmas***, 1996, 3(5): 2098.

[5] Gong Kun, Ma Jinglong, Xiang Yihuai, et al. Development of the angular multiplexing system of the MOPA in Heaven-I [J]. ***High Power Laser and Particle Beams***, 2002, 14(5): 671-676. (in Chinese)
龚堃, 马景龙, 向益淮, 等. 天光一号 MOPA 光学角多路系统的研制[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(5): 671-676.

[6] Xiang Yihuai, Gao Zhixing, Tong Xiaohui, et al. Development of new angular multiplexing for "Heaven I"[J]. ***High Power Laser and Particle Beams***, 2006, 18(5): 795-799. (in Chinese)
向益淮, 高智星, 佟小惠, 等. 天光一号平滑化角多路系统的建立[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(5): 795-799.

[7] Zhang Yongsheng, Zhao Jun, Ma Lianying, et al. Optical design of high power excimer laser system [J]. ***High Power Laser and Particle Beams***, 2011, 23(7): 1857-1860. (in Chinese)
张永生, 赵军, 马连英, 等. 高功率准分子激光系统光学设计[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(7): 1857-1861.

[8] Ma Lianying, An Xiaoxia, Zhang Yongsheng. Multiplexing decoding and coding method based on separated arrays arranged with equal interval [J]. ***High Power Laser and Particle Beams***, 2012, 24(11): 2591-2594. (in Chinese)
马连英, 安晓霞, 张永生. 角多路等间距分立阵列编解码方法[J]. 强激光与粒子束, 2011, 24(11): 2591-2594.