



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 119481908 B

(45) 授权公告日 2025. 04. 11

(21) 申请号 202510052079.0

H01S 3/106 (2006.01)

(22) 申请日 2025.01.14

H01S 3/136 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 119481908 A

(56) 对比文件

CN 115084978 A, 2022.09.20

CN 117650414 A, 2024.03.05

(43) 申请公布日 2025.02.18

审查员 韩金鑫

(73) 专利权人 长春理工大学

地址 130022 吉林省长春市卫星路7089号

(72) 发明人 陈薪羽 刘景良 唐文婷 张晶
李小宁 张晓雷 于永吉 金光勇
何洋 姜相宇 李若冰

(74) 专利代理机构 哈尔滨市阳光惠远知识产权
代理有限公司 23211

专利代理师 刘景祥

(51) Int. Cl.

H01S 3/08 (2023.01)

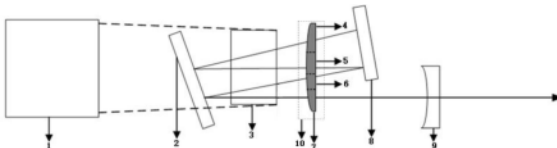
权利要求书1页 说明书5页 附图1页

(54) 发明名称

一种多程折叠光束质量增强系统

(57) 摘要

一种多程折叠光束质量增强系统。属于激光器光学设计技术领域,具体涉及激光器的光束质量控制技术领域。其解决了以往的多程折叠腔由于受到热效应的影响导致的光束质量的劣化问题。所述系统包括激光二极管泵浦源、M1反射镜、增益介质晶体Tm:YLF、组合柱透镜、M2反射镜以及输出耦合镜。通过在多程折叠腔中设置一组不同焦距的柱透镜,可以灵活地对腔内的光束进行调整。柱透镜因其特殊的聚焦特性,能够在一个方向上集中光束,而在另一个方向上保持平行传播,因此适用于对多程腔中光束的特定方向进行补偿。通过设计不同焦距的柱透镜组,本发明能够实现对光束在不同传播位置上的分段补偿,极大地提升了补偿的灵活性和准确性。



1. 一种多程折叠光束质量增强系统,其特征在于,所述系统包括激光二极管泵浦源(1)、M1反射镜(2)、增益介质晶体Tm:YLF(3)、组合柱透镜(10)、M2反射镜(8)以及输出耦合镜(9);

所述激光二极管泵浦源(1)产生用于激发增益介质晶体Tm:YLF(3)的泵浦光束并射入增益介质晶体Tm:YLF(3),增益介质晶体Tm:YLF(3)在泵浦光束的作用下产生激光增益,并发射出激光束,所述M1反射镜(2)、增益介质晶体Tm:YLF(3)、组合柱透镜(10)以及M2反射镜(8)组成多程折叠腔,其中,增益介质晶体Tm:YLF(3)和组合柱透镜(10)放置在M1反射镜(2)和M2反射镜(8)之间,在M1反射镜(2)和M2反射镜(8)的反射作用下所述激光束反复经过增益介质晶体Tm:YLF(3)和组合柱透镜(10),并最终通过输出耦合镜(9)输出;

所述组合柱透镜(10)包括F1柱透镜(4)、F2柱透镜(5)、F3柱透镜(6)和F4柱透镜(7),各柱透镜在光路折叠方向上依次进行排列,在所述多程折叠腔中,激光束依次经过F1柱透镜(4)、F2柱透镜(5)、F3柱透镜(6)和F4柱透镜(7),其中,F1柱透镜(4)用于初步聚焦补偿,F2柱透镜(5)和F3柱透镜(6)用于逐步调整激光束,F4柱透镜(7)用于最终调整激光束;

组合柱透镜(10)中,各柱透镜的焦距 $f_i, i=1、2、3、4$,满足: $f1 < f2 < f3 < f4$;
 $f_i = \frac{R_i}{n_i}$;其中, $f1$ 表示F1柱透镜(4)的焦距, $f2$ 表示F2柱透镜(5)的焦距, $f3$ 表示F3柱透镜(6)的焦距, $f4$ 表示F4柱透镜(7)的焦距;

其中 R_i 为激光束通过热透镜效应区域后的等效曲率半径, n_i 为对应柱透镜材料的折射率;所述热透镜效应区域发生在增益介质晶体Tm:YLF(3)的范围内。

2. 根据权利要求1所述的多程折叠光束质量增强系统,其特征在于,所述激光二极管泵浦源(1)产生用于激发增益介质晶体Tm:YLF(3)的792nm泵浦光束。

3. 根据权利要求2所述的多程折叠光束质量增强系统,其特征在于,所述M1反射镜(2)和M2反射镜(8)均是斜置的平面镜,M1反射镜(2)还用于将泵浦光从激光二极管泵浦源(1)引导至增益介质晶体Tm:YLF(3)中。

一种多程折叠光束质量增强系统

技术领域

[0001] 本发明属于激光器光学设计技术领域,具体涉及激光器的光束质量控制技术领域。

背景技术

[0002] 随着高功率激光器在工业加工、医疗、科研等领域的广泛应用,如何在高功率输出的同时保持激光光束的高质量,成为激光器设计中的关键技术问题。特别是在多程折叠腔激光器中,光束多次通过增益介质,产生累积增益的同时不可避免地带来热效应、模差、光学畸变等影响,这些因素会导致激光光束质量的显著降低。为了克服这些问题,许多光学设计方案致力于通过补偿和校正光束质量的手段,保持腔内光束的高稳定性和高聚焦性。

[0003] 在高功率激光器的设计中,多程折叠腔结构是一种常用的增益提升方法。通过让激光光束在增益介质中多次往返,多程折叠腔可以有效增加光束的光程,从而显著提升激光器的增益。特别是在固体激光器中,采用多程折叠腔结构能够在有限的增益介质长度内实现更高的输出功率。

[0004] 然而,多程折叠腔在带来增益提升的同时,也对光束质量带来了不利影响。由于光束在腔内反复经过增益介质和反射元件,每次经过增益介质时会受到热效应的影响,使得光束的光学路径逐渐发生畸变。这种畸变不仅影响到光束的空间模式,还会引发光斑发散和聚焦不均匀等问题,导致输出光束的质量下降。此外,在折叠腔内多次反射的过程中,各个光程之间的焦点变化不一,进一步加剧了光束质量的劣化。

发明内容

[0005] 本发明为了解决以往的多程折叠腔由于受到热效应的影响导致的光束质量的劣化问题,提供一种多程折叠光束质量增强系统。

[0006] 所述系统包括激光二极管泵浦源、M1反射镜、增益介质晶体Tm:YLF、组合柱透镜、M2反射镜以及输出耦合镜;

[0007] 所述激光二极管泵浦源产生用于激发增益介质晶体Tm:YLF的泵浦光束并射入增益介质晶体Tm:YLF,增益介质晶体Tm:YLF在泵浦光束的作用下产生激光增益,并发射出激光束,所述M1反射镜、增益介质晶体Tm:YLF、组合柱透镜以及M2反射镜组成多程折叠腔,其中,增益介质晶体Tm:YLF和组合柱透镜放置在M1反射镜和M2反射镜之间,在M1反射镜和M2反射镜的反射作用下所述激光束反复经过增益介质晶体Tm:YLF和组合柱透镜,并最终通过输出耦合镜输出。

[0008] 进一步,所述组合柱透镜包括F1柱透镜、F2柱透镜、F3柱透镜和F4柱透镜,各柱透镜在光路折叠方向上依次进行排列,在所述多程折叠腔中,激光束依次经过F1柱透镜、F2柱透镜、F3柱透镜和F4柱透镜,其中,F1柱透镜用于初步聚焦补偿,F2柱透镜和F3柱透镜用于逐步调整激光束,F4柱透镜用于最终调整激光束。

[0009] 进一步,组合柱透镜中,各柱透镜的焦距 f_i ($i=1、2、3、4$)满足:

$$f1 < f2 < f3 < f4。$$

[0010] 进一步,组合柱透镜中,各柱透镜的焦距 f_i 满足: $f_i = \frac{R_i}{n_i}$;

[0011] 其中 R_i 为激光束通过热透镜效应区域后的等效曲率半径, n_i 为对应柱透镜材料的折射率。

[0012] 进一步,所述热透镜效应区域发生在增益介质晶体 $Tm:YLF$ 的范围内。

[0013] 进一步,所述激光二极管泵浦源产生用于激发增益介质晶体 $Tm:YLF$ 的792nm泵浦光束。

[0014] 进一步,所述M1反射镜和M2反射镜均是斜置的平面镜,M1反射镜还用于将泵浦光从激光二极管泵浦源引导至增益介质晶体 $Tm:YLF$ 中。

[0015] 本发明所述系统的有益效果为:

[0016] 通过在多程折叠腔中设置一组不同焦距的柱透镜,可以灵活地对腔内的光束进行调整。柱透镜因其特殊的聚焦特性,能够在一个方向上集中光束,而在另一个方向上保持平行传播,因此适用于对多程腔中光束的特定方向进行补偿。通过设计不同焦距的柱透镜组,本发明能够实现对光束在不同传播位置上的分段补偿,极大地提升了补偿的灵活性和准确性。同时,柱透镜的多焦距特性使其能够根据光束在腔内不同位置的模式特征进行差异化调整,从而有效地消除热透镜效应、模差、光学畸变等对光束质量的影响。

[0017] 此外,本发明的多焦距柱透镜组不仅可对光束的质量进行补偿,还能通过特定的焦距组合优化腔模与泵浦光的匹配度,使得激光器在高功率工作下保持稳定的输出特性。这一创新设计大大拓宽了激光器在高功率、长时间工作中的应用范围,也为高精度的工业加工、医疗应用以及精密测量等领域提供了技术支持。

附图说明

[0018] 图1为本发明实施例中多程折叠光束质量增强系统结构图;

[0019] 图2为本发明实施例中多程折叠腔等效腔示意图。

具体实施方式

[0020] 下面将结合附图对本发明的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明的保护范围。

[0021] 所述系统如图1所示,包括激光二极管泵浦源1、M1反射镜2、增益介质晶体 $Tm:YLF$ 3、组合柱透镜10、M2反射镜8以及输出耦合镜9;

[0022] 所述激光二极管泵浦源1产生用于激发增益介质晶体 $Tm:YLF$ 3的泵浦光束并射入增益介质晶体 $Tm:YLF$ 3,增益介质晶体 $Tm:YLF$ 3在泵浦光束的作用下产生激光增益,并发射出激光束,所述M1反射镜2、增益介质晶体 $Tm:YLF$ 3、组合柱透镜10以及M2反射镜8组成多程折叠腔,其中,增益介质晶体 $Tm:YLF$ 3和组合柱透镜10放置在M1反射镜2和M2反射镜8之间,在M1反射镜2和M2反射镜8的反射作用下所述激光束反复经过增益介质晶体 $Tm:YLF$ 3和组合柱透镜10,并最终通过输出耦合镜9输出。

[0023] 所述组合柱透镜10包括F1柱透镜4、F2柱透镜5、F3柱透镜6和F4柱透镜7,各柱透镜

在光路折叠方向上依次进行排列,在所述多程折叠腔中,激光束依次经过F1柱透镜4、F2柱透镜5、F3柱透镜6和F4柱透镜7,其中,F1柱透镜4用于初步聚焦补偿,F2柱透镜5和F3柱透镜6用于逐步调整激光束,F4柱透镜7用于最终调整激光束。

[0024] 初步聚焦补偿的核心目标是针对因热透镜效应等原因导致的光束发散进行初步的调整,确保激光束在腔内的传播能够保持良好的质量。初步聚焦补偿的最终目标是确保激光束进入增益介质晶体Tm:YLF3时,其光斑适中、质量高,并且能够有效地控制由于热透镜效应带来的发散,从而提高整个系统的效率和稳定性。通过F1柱透镜4,可以在系统工作过程中确保激光束的传播状态符合腔内模式的要求,避免光束的过度发散或畸变。

[0025] 逐步调整激光束是设计的多程折叠光束质量增强系统中的关键调节步骤,它是通过组合柱透镜组中的F2柱透镜5和F3柱透镜6来实现的。这个过程的核心目标是针对光束在多程折叠腔中传播过程中,由于热效应和光束传播的逐步变化,进一步调整光束的质量、大小和发散角度,以确保激光束在经过增益介质晶体Tm:YLF3和整个光路后,能够保持良好的模式和光束质量。

[0026] 最终调整激光束由F4柱透镜7(在组合柱透镜10中的最后一块透镜)完成。这个过程的核心目标是优化激光束在经过增益介质晶体Tm:YLF3和多次折叠反射后,最终经过输出耦合镜9时的光束质量和传播特性。通过精细调整F4柱透镜7的焦距,可以补偿之前柱透镜的误差,优化光束的传输,保证最终输出的激光束具备高质量、高效率和稳定的性能。

[0027] 在所述多程折叠腔中,激光束从增益介质晶体中经过多次反射和传输,依次穿过不同焦距的柱透镜,实现光束的聚焦调整。腔内的光路由初始的M2反射镜8开始,经由组合柱透镜10和增益介质晶体Tm:YLF3,再反射至M1反射镜2,通过反射镜和柱透镜组的配合实现四程传输,最后由输出耦合镜9输出激光。

[0028] M1反射镜2和M2反射镜8:用于腔内多次反射,配合组合柱透镜10实现四程折叠光路。

[0029] 为实现有效的光束质量补偿,组合柱透镜10的焦距需根据热透镜效应引发的光束发散角和腔模结构进行设计。设定每个柱透镜的焦距为 f_i ($i=1,2,3,4$),以补偿光束在不同位置上的发散和聚焦效应。通过调节每个柱透镜的焦距,可以对光束在不同传播段的聚焦效果进行精确控制,使得腔内光束的模半径保持稳定。

[0030] 为了实现有效补偿,各柱透镜的焦距 f_i 满足以下条件:

$$[0031] \quad f_i = \frac{R_i}{n_i}$$

[0032] 其中 R_i 为光束通过热透镜效应区域后的等效曲率半径, n_i 为对应柱透镜材料的折射率。

[0033] 热透镜效应区域主要发生在增益介质晶体Tm:YLF3的范围内,在晶体内部,由于泵浦光束的非均匀吸收和热量沉积,温度分布呈现梯度变化,从而形成一个等效的“热透镜”,在该区域中:热量的累积导致晶体内的折射率沿径向分布不均,形成类抛物面的折射率分布,等效为一个正透镜,导致激光束的发散或聚焦,它是光束发散和模式畸变的主要来源。

[0034] 根据四程腔的光路长度和传输特性,柱透镜的焦距选取需满足多程传输中的等效热透镜效应的消减要求,使得激光在腔内各路径上的发散角始终得到有效抑制。

[0035] 组合柱透镜10设计包括四个柱透镜,分别设定为:F1柱透镜4、F2柱透镜5、F3柱透镜6和F4柱透镜7。

[0036] 由于热透镜效应引起的光束发散问题,采用等效透镜法来描述增益介质的热效应对光束的影响。根据热效应的特性,增益介质可以被等效为一个聚焦透镜,其焦距 $f_{thermal}$ 由热效应参数和泵浦功率决定,具体公式如下:

$$[0037] \quad f_{thermal} = \frac{K \cdot A}{P_{pump}};$$

[0038] 其中 K 为材料的热导率, A 为晶体的面积, P_{pump} 为泵浦功率。

[0039] 通过在组合柱透镜10的设计中加入热透镜效应等效焦距,结合不同焦距的柱透镜补偿,能够有效地减少光束发散,提高光束质量。

[0040] 激光二极管泵浦源1是增益介质晶体Tm:YLF3泵浦源,产生用于激发增益介质晶体Tm:YLF3的792nm泵浦光束。该光束通过光路中的透镜组进行聚焦和传输。M1反射镜2是一个斜置的平面镜,将泵浦光从激光二极管泵浦源1引导至增益介质晶体Tm:YLF3中,M1反射镜2将激光二极管泵浦源1的光束调整到正确的方向,使其能够有效地进入后续光路中的增益介质晶体Tm:YLF3中。

[0041] 在泵浦光的作用下,增益介质晶体Tm:YLF3产生激光增益,并发射出近红外波段的激光输出。激光束在晶体内多次通过,以增大激光增益。组合柱透镜10用于补偿光束的聚焦和发散。每个柱透镜的焦距不同,排列顺序从短到长。光束经过这些柱透镜时,光斑得到调整,使其逐渐补偿增益介质中的热效应引起的波前畸变。F1柱透镜4用于初步聚焦补偿,F2柱透镜5和F3柱透镜6用于逐步调整光束,F4柱透镜7则用于最终的精细调节。M2反射镜8是一个反射镜,进一步引导光束,使其在腔内经过组合柱透镜10后返回,以实现多程光束传输。通过M2反射镜8的反射,光束可以多次经过增益介质,提高激光增益和输出功率。输出耦合镜9是多程折叠腔的输出镜,允许部分光束透过形成激光输出。输出耦合镜9的曲率半径和透过率设计有助于控制光束质量,并实现高效的激光输出。

[0042] 如图 2所示为多程折叠腔等效腔示意图,由此可见,本发明还极大程度上的节省了激光器的空间,对本发明系统的设计思路进行进一步阐述:

[0043] 在设计组合柱透镜10的焦距时,需要充分考虑多程折叠腔中光束的变化特性,以实现光束质量的有效补偿。该设计的基本原理依赖于光束在腔内传输过程中所经历的聚焦与发散效应。通过引入不同焦距的柱透镜,能够逐步抵消因光束多次传输而积累的波前畸变和散焦效应。

[0044] 在多程折叠腔中,光束每次经过增益介质时都会受到热透镜效应的影响,这种效应会改变光束的聚焦状态,使其在增益介质中发生散焦或聚焦。因此,设计组合柱透镜10的第一步是通过ABCD传输矩阵分析,研究光束在多程传输中的模式演变及其发散趋势,进而确定哪些位置需要进行光束的聚焦补偿。

[0045] 为了有效补偿光束在不同传输路径上所经历的散焦或聚焦变化,组合柱透镜10的焦距设计需要遵循两个主要原则。首先是渐变焦距,即柱透镜的焦距应当从短到长逐步过渡,或者根据光束在传输中的变化需求进行非线性分布。这种渐变焦距设计可以逐步补偿光束的发散或聚焦趋势。其次是通过不同焦距透镜的组合形成“补偿链”,使每个透镜的光束变换效果相互叠加,从而逐步校正光束质量。

[0046] 柱透镜组的焦距设计基于光束的瑞利长度和光斑半径的变化情况。瑞利长度(Rayleigh Range)描述了光束聚焦或散焦时的变化范围。在设计过程中,对于光束发散较大的位置,应选择较短焦距的柱透镜,以快速收束光束;而对于发散较小的位置,则应采用较长焦距的透镜,进行轻微的调整。这样能够缓解光束畸变,确保不同路径上的光斑质量保持均匀。

[0047] 通过逐级配置不同焦距的柱透镜,能够实现对光束质量的渐进补偿,使光束在传输过程中逐步趋于稳定。这种设计不仅有效抵消了光束因多程折叠腔造成的波前畸变,还能确保输出光束接近高斯模式或其他理想模式,从而提升激光器的整体性能。

[0048] 在具体设计中,组合柱透镜10可以由多个不同焦距的透镜组成,形成一个渐进式的补偿结构。例如,假设组合柱透镜10需要包含四个透镜,焦距从短到长依次为 f_1 、 f_2 、 f_3 和 f_4 。每个透镜的设计和位置安排都遵循特定的原则。 F_1 柱透镜4的焦距较短,主要用于初步收束光束,尤其是在光束离开增益介质后的第一反射位置。 F_2 柱透镜5的焦距略长于 F_1 柱透镜4,进一步校正光束的发散, F_3 柱透镜6的焦距为中等长度,用于对已经部分收束的光束进行逐步调整。最后, F_4 柱透镜7的焦距最长,主要用于对光束进行精细调节,确保光束在进入输出镜前保持良好的模式和发散度。

[0049] 这种渐进焦距的设计使每个透镜的补偿效果能够相互叠加,逐步减少光束的畸变。在设计具体焦距时,还需考虑光束的瑞利长度和光斑半径的变化。在光束发散较大的位置,通常选择较短焦距的柱透镜以实现快速收束;而在光束发散较小的区域,较长焦距的柱透镜则能够进一步稳定光束。在焦距设计时,可以通过ABCD矩阵传输方法模拟光束的传输,计算每一程中光斑大小和传播参数,以确定合适的透镜焦距。逐级补偿的设计方法有助于在多程折叠腔内保持光束质量的一致性和稳定性。

[0050] 柱透镜的安装位置和角度同样对补偿效果至关重要。各个透镜应根据光束的传播路径和方向进行精确布置,确保光束在经过增益介质后的第一程能够被 F_1 柱透镜4有效收束,其他透镜依次跟进。为了避免角度误差引发的光学像差,透镜的表面应与光束传播方向保持垂直,并可设计可调节的透镜支架,方便微调透镜角度。

[0051] 在材料选择上,柱透镜应采用热稳定性高、低吸收系数的材料,如熔融石英或高品质K9玻璃,以保证在高功率激光下的热稳定性。同时,透镜组的安装需要使用高精度的定位系统,确保每个透镜的位置和角度精确符合设计要求,保证补偿效果的一致性。

[0052] 通过合理设计和优化组合柱透镜10的焦距,能够有效改善光束质量,提升激光器的整体性能。相比传统的单焦距透镜组,这种渐进焦距设计在以下方面具有明显优势:一是增强光束质量,通过逐步补偿使光束质量接近理想模式;二是提高系统适应性,不同焦距组合适应了多程折叠腔内复杂的光束路径,能够更好地应对光束的畸变和发散;三是支持高功率输出,优化的材料和焦距设计使得透镜组在高功率条件下仍能保持稳定的光学特性,从而支持激光器的高功率运行。

[0053] 综上所述,通过合理设计不同焦距的组合柱透镜10,可以实现对多程折叠腔中光束质量的有效补偿,这一设计在工程应用中具有重要价值。通过优化和改进组合柱透镜10的设计,可以显著改善激光器的光束质量,为高功率激光应用提供可靠的解决方案。

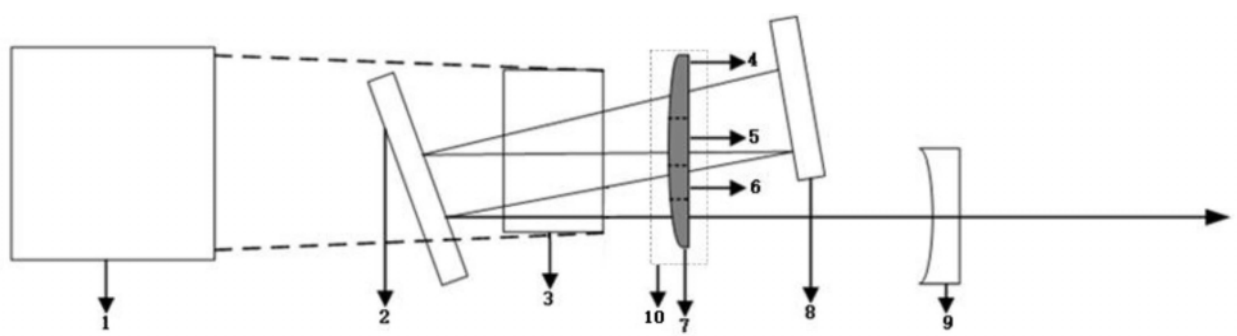


图1

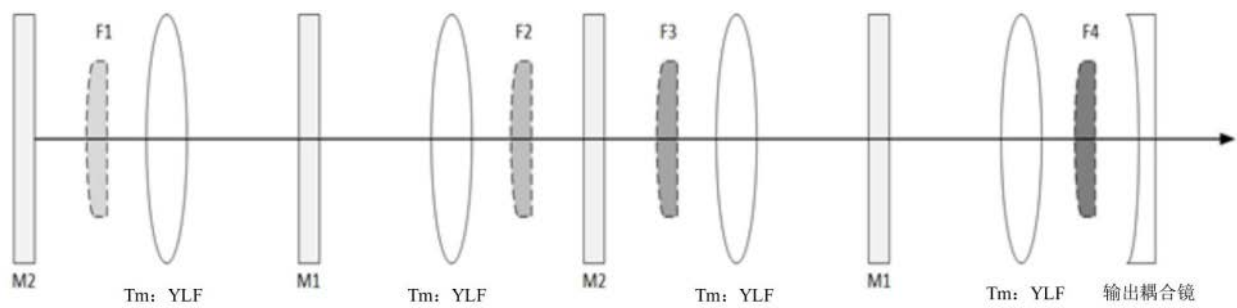


图2