



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 101859025 A

(43) 申请公布日 2010. 10. 13

(21) 申请号 201010190059. 3

(22) 申请日 2010. 06. 03

(71) 申请人 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

地址 130033 吉林省长春市东南湖大路  
3888 号

(72) 发明人 张俊 王立军 王琪 郝明明  
张志军

(74) 专利代理机构 长春菁华专利商标代理事务所 22210

代理人 张伟

(51) Int. Cl.

G02B 27/09 (2006. 01)

H01S 5/40 (2006. 01)

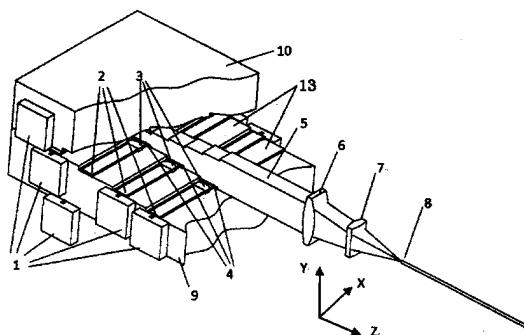
权利要求书 1 页 说明书 6 页 附图 3 页

(54) 发明名称

一种可重复使用的大功率半导体激光器光纤输出模块

(57) 摘要

本发明涉及激光器领域，特别是一种可重复使用的大功率半导体激光器光纤输出模块，该发明包括激光光束整形系统、聚焦系统、上阶梯底座、下阶梯底座，上阶梯底座与下阶梯底座通过彼此的上端面相扣合，激光光束整形系统安装在上、下阶梯底座外的出射光的方向上，所说的下阶梯底座上的台阶交错分布，不同侧的台阶在下阶梯底座中间彼此的接触面呈 V 形，整个台阶接触面呈 V 字形波浪，所说的上阶梯底座跟下阶梯底座结构相同。本发明可重复利用，无水冷，体积小，可实现高功率高亮度输出。



1. 一种可重复使用的大功率半导体激光器光纤输出模块,其特征在于,包括激光光束整形系统、聚焦系统、上阶梯底座(10)、下阶梯底座(9),上阶梯底座(10)与下阶梯底座(9)通过彼此的上端面相扣合,激光光束整形系统安装在上、下阶梯底座的台阶(13)上,聚焦系统位于上、下阶梯底座外的出射光的方向上,所说的下阶梯底座(9)上的台阶(13)交错分布,不同侧的台阶(13)在下阶梯底座(9)中间彼此的接触面呈V形,整个台阶(13)接触面呈V字形波浪,所说的上阶梯底座(10)跟下阶梯底座(9)结构相同。

2. 根据权利要求1所述的可重复使用的大功率半导体激光器光纤输出模块,其特征在于,所说的聚焦系统包括快轴聚焦镜(6)、慢轴聚焦镜(7)和光纤(8),快轴聚焦镜(6)和慢轴聚焦镜(7)的后焦点与光纤(8)端面的中心重合,快轴聚焦镜(6)、慢轴聚焦镜(7)和光纤(8)端面是同轴光学系统。

3. 根据权利要求1或2所述的可重复使用的大功率半导体激光器光纤输出模块,其特征在于,所说的激光光束整形系统包括半导体激光器单管(1)、快轴准直镜(2)、慢轴准直镜(3)和直角棱镜(4),快轴准直镜(2)、慢轴准直镜(3)、直角棱镜(4)安装在阶梯底座的台阶(13)上,直角棱镜的两个底角均为45°,直角棱镜(4)斜边平行于台阶(13)V字形接触面,慢轴准直镜(3)的慢轴出光边(14)与直角棱镜(4)Z方向上的直角边对应,快轴准直镜(2)的快轴出光边(15)与慢轴准直镜(3)的慢轴入光边(16)对应,半导体激光器单管(1)安装在上阶梯底座(10)或下阶梯底座(9)的侧面,所说的半导体激光器单管(1)包括激光器单管(12)和热沉块(11),激光器单管(12)安装在热沉块(11)的一个侧面上,激光器单管(12)的出光点对应快轴准直镜的入光边(17),激光器单管(12)、快轴准直镜(2)、慢轴准直镜(3)和直角棱镜(4)Z方向上的直角边为同轴光学系统。

4. 根据权利要求3所述的可重复使用的大功率半导体激光器光纤输出模块,其特征在于,所说的半导体激光器单管(1)之间不重叠,相隔放置。

5. 根据权利要求3所述的可重复使用的大功率半导体激光器光纤输出模块,其特征在于,所说的台阶(13)高度与慢轴准直镜(3)输出光束Y方向上的全宽一致,台阶(13)宽度与同一阶梯底座同侧相邻半导体激光器单管(1)间的距离一致;相扣合的异侧相邻台阶(13)总长为两侧半导体激光器单管(1)到中间的直角棱镜(4)的斜边的中点距离之和。

6. 根据权利要求1所述的可重复使用的大功率半导体激光器光纤输出模块,其特征在于,所说的快轴聚焦镜(6)、慢轴聚焦镜(7)、光纤(8)端面、快轴准直镜(2)、慢轴准直镜(3)和直角棱镜(4)的光学折射面均镀有增透膜。

## 一种可重复使用的大功率半导体激光器光纤输出模块

### 技术领域

[0001] 本发明涉及激光器领域,特别是可重复使用的大功率半导体激光器光纤输出模块。

### 背景技术

[0002] 半导体激光器以其体积小、重量轻和转换效率高等优点,应用于工业和军事的各个方面。但由于半导体激光器自身缺陷,慢轴方向的光束质量远差于快轴方向,输出光斑为非对称光斑,能量分布不均匀,限制了它在一些对光束质量要求较高场合的应用。通过光纤输出的光具有光斑圆化,能量分布均匀的优点,同时它还可实现任意角度,较长距离的传输,因此通过光纤输出的光可很好地运用于工业加工中的激光切割和激光打孔等方面。同时作为泵浦源,光纤输出的光也可直接输入光纤激光器,实现高效率泵浦。因此半导体激光器耦合光纤输出技术的研究成为了激光应用研究的一个重要方向。随着工业的发展,人们对固体和光纤激光器输出功率和效率的要求越来越高,这就对作为泵浦源的半导体激光器输出功率和光束质量的要求也越来越高。总之,对单光纤中输出高功率的半导体激光模块的需求越来越急迫。

[0003] 目前,单光纤实现高功率输出的半导体激光器模块主要存在以下几方面的问题:1)作为耦合单元的半导体激光器 Bar 条光斑不对称,不能直接进光纤,需要光束变换系统将光切割重排,由于光束变换系统造价昂贵、装调复杂,这无疑增加了系统的成本和调试难度;2)功率超过 60W 的激光器均需水冷系统进行冷却,这使得整个系统的体积增加,重量加大,实际应用不方便;3)尽管半导体激光器具有长寿命,但也难免会出现质量较差的激光器,一般的系统不容易更换激光器,一旦系统中出现劣质激光器,这将会导致整个系统的性能下降。目前,美国专利“semiconductor diode lasers with a specific geometry, US6124973, Frannhofer, 2000 ;Modular diode laser assembly, US0268946, nlight, 2007 ;Diode laser arrangement with a plurality of diode laser arrays, US689822, Jenoptik Laserdiode GmbH, 2005”中只有一个底座,底座上只有一排激光器激射,功率较低。

[0004] 因此,研制出一种多个半导体激光器空间耦合单光纤实现大功率输出,无水冷,可重复利用的激光模块势在必行。

### 发明内容

[0005] 针对上述情况,为解决现有技术之缺陷,本发明的目的就在于提出一种可重复利用的、无水冷、小体积、多激光器耦合进一根光纤,可实现高功率高亮度输出的半导体激光器模块,以应用于一些对光源体积、光束质量和功率要求较高的场合。

[0006] 本发明解决技术问题所采用的技术方案是,可重复使用的大功率半导体激光器光纤输出模块包括激光光束整形系统、聚焦系统、上阶梯底座、下阶梯底座,上阶梯底座与下阶梯底座通过彼此的上端面相扣合,激光光束整形系统安装在上、下阶梯底座的台阶上,聚

焦系统位于上、下阶梯底座外的出射光的方向上,所说的下阶梯底座上的台阶交错分布,不同侧的台阶在下阶梯底座中间彼此的接触面呈V形,整个台阶接触面呈V字形波浪,所说的上阶梯底座跟下阶梯底座结构相同。

[0007] 本发明的有益效果:本发明可重复利用、无水冷、体积小、可实现高功率高亮度输出,以应用于一些对光源体积、光束质量和功率要求较高的场合。采用多个半导体激光器单管耦合,不需光束切割重排,可以直接进光纤,很好地解决光束变换系统的问题;采用C-Mount封装的激光器,去掉了极不便利的水冷系统,同时也减小了系统的体积和重量;整个系统激光器采用无重叠组合,可随意更换激光器,而不影响其他,保证了系统的整体性能;同时此模块可实现重复使用,增长了使用寿命;有四排激光器,功率提高了四倍,这四排激光器中,任意一排与其相邻的激光器交错排列,与其对角线上的激光器呈对称排列,这种排列使整体结构变得十分紧凑,减小光程,同时也使各个激光器产生的热量分散,便于散热。

## 附图说明

- [0008] 图1是本发明的可重复使用的大功率半导体激光器光纤输出模块的整体结构图。
- [0009] 图2是本发明的半导体激光器单管示意图。
- [0010] 图3是本发明的同一底座同侧激光器放置位置示意图。
- [0011] 图4是本发明的单个激光器输出快慢轴准直后经直角棱镜偏转光轴的光路传播示意图。
- [0012] 图5是本发明的阶梯底座示意图。
- [0013] 图6是本发明的同一阶梯底座的激光光束整形系统的安装位置示意图。
- [0014] 图7是本发明的两个阶梯扣合后同侧激光器的位置示意图。
- [0015] 图中,1、半导体激光器单管,2、快轴准直镜,3、慢轴准直镜,4、直角棱镜,5、激光光速,6、快轴聚焦镜,7、慢轴聚焦镜,8、光纤,9、下阶梯底座,10、上阶梯底座,11、热沉块,12、激光器单管,13、台阶,14、慢轴出光边,15、快轴出光边,16、慢轴入光边,17、入光边。

## 具体实施方式

- [0016] 以下结合附图对本发明的具体实施方式做详细说明。
- [0017] 由图1-7所示,本发明包括包括激光光束整形系统、聚焦系统、上阶梯底座10、下阶梯底座9,上阶梯底座10与下阶梯底座9通过彼此的上端面相扣合,激光光束整形系统安装在上、下阶梯底座的台阶13上,聚焦系统位于上、下阶梯底座外的出射光的方向上,所说的下阶梯底座9上的台阶13交错分布,不同侧的台阶13在下阶梯底座9中间彼此的接触面呈V形,整个台阶13接触面呈V字形波浪,所说的上阶梯底座10跟下阶梯底座9结构相同。
- [0018] 由图5所示,所说的聚焦系统包括快轴聚焦镜6、慢轴聚焦镜7和光纤8,快轴聚焦镜6和慢轴聚焦镜7的后焦点与光纤8端面的中心重合,快轴聚焦镜6、慢轴聚焦镜7和光纤8端面是同轴光学系统。
- [0019] 由图2、6所示,所说的激光光束整形系统包括半导体激光器单管1、快轴准直镜2、慢轴准直镜3和直角棱镜4,快轴准直镜2、慢轴准直镜3、直角棱镜4安装在阶梯底座的台

阶 13 上,直角棱镜的两个底角均为 45° ,直角棱镜 4 斜边平行于台阶 13V 字形接触面,慢轴准直镜 3 的慢轴出光边 14 与直角棱镜 4Z 方向上的直角边对应,快轴准直镜 2 的快轴出光边 15 与慢轴准直镜 3 的慢轴入光边 16 对应,半导体激光器单管 1 安装在上阶梯底座 10 或下阶梯底座 9 的侧面,所说的半导体激光器单管 1 包括激光器单管 12 和热沉块 11,激光器单管 12 安装在热沉块 11 的一个侧面上,激光器单管 12 的出光点对应快轴准直镜的入光边 17,快轴准直镜 2 和慢轴准直镜 3 共光轴,激光器单管 12 的出光点和直角棱镜 4Z 方向上的直角边的中点在快轴准直镜 2 和慢轴准直镜 3 的光轴上。

[0020] 由图 3 所示,所说的半导体激光器单管 1 之间不重叠,相隔放置。

[0021] 由图 6 所示,所说的台阶 13 高度与慢轴准直镜 3 输出光束 Y 方向上的全宽一致,台阶 13 宽度与同一阶梯底座同侧相邻半导体激光器单管 1 间的距离一致;相扣合的异侧相邻台阶 13 总长为两侧半导体激光器单管 1 到中间的直角棱镜 4 的斜边的中点距离之和。

[0022] 所说的快轴聚焦镜 6、慢轴聚焦镜 7、光纤 8 端面、快轴准直镜 2、慢轴准直镜 3 和直角棱镜 4 的光学折射面均镀有增透膜。

[0023] 所说的阶梯底座采用高热导率材料制作。

[0024] 本发明涉及了一种由多个半导体激光器单管耦合经光纤输出的模块,本模块包括 n 个 C-Mount 封装的半导体激光器单管,快轴准直镜、慢轴准直镜,直角棱镜,快轴聚焦镜、慢轴聚焦镜、光纤、下阶梯底座和上阶梯底座。放置在阶梯底座上的每一个半导体激光器单管输出的光先通过快轴准直镜和慢轴准直镜准直,再经过与之对应的直角棱镜反射,将每束光的光轴偏转 90° ,然后所有光在 Y 上叠加形成光束,再分别用快轴聚焦镜和慢轴聚焦镜将光斑聚焦到同一点,光纤的一个端面放置在两个聚焦镜共同的焦点上,最后光从光纤另一端输出。

[0025] 所述的激光器放置在底座的侧端面,各个激光器之间互不叠加,激光器与底座的结合方式采用无损伤可拆卸的方式结合,可以在互不影响的情况下,更换不合适的激光器,以提高系统的性能。

[0026] 所述的阶梯底座台阶高度和台阶宽度分别是由激光器准直后的快轴方向的光束宽度和激光器的位置决定的。为了获得高的光功率密度,光束要在快轴方向上无间隔地叠加,每一台阶的高度和准直后快轴方向的宽度一致,这样,相邻台阶的两束光就相当于在快轴方向是正好无间隔叠加。由于激光模块要实现无重叠地耦合激光器,因此台阶的宽度正好为同一底座同侧相邻激光器的距离。为了便于散热,整个阶梯底座采用热导率高的材料制成。

[0027] 所述的直角棱镜放置在台阶底座的中间,反射斜边可镀有高反射率膜,也可不镀高反射率膜,通过直角棱镜的内反射直接改变光路。各个激光器激射出的光经快慢轴准直后,由中间的直角棱镜将光轴偏折 90° ,使得各个激光器和准直元件不与耦合后光的光轴重合,这样对各个激光器和准直元件的物理特性(尺寸和位置)降低了要求,只要满足本光路条件即可,降低了系统的安装和调试要求。有些特殊情况如需要各个光路等光程时,偏折光路可以让激光器和准直元件在 X 方向上移动,很好地满足等光程要求。相反,若采用不偏折光轴系统,激光器和准直元件与耦合后的光束同轴,为了使各个光路之间不相互影响,必须对各个激光器的位置做非常准确的定位,各个准直元件的大小也有严格要求,不能对其他激光器输出的光产生影响,如挡光或偏折光,这就增加了系统的难度。

[0028] 所述的聚焦方式采用快慢轴分别聚焦的方法入光纤。经耦合后的光采用简单的快慢轴分别聚焦的方法进入光纤,这可以使系统减小光损失,结构也变得简单。由于耦合后的光束发散角很小,光斑很大,不适合直接进光纤,需要聚焦镜来均衡光束发散角和光斑大小。其聚焦方法一般有两种:一是先经过扩束或压缩,使光束在快慢轴方向的发散角均相等,然后用一块聚焦镜聚焦;一是用两块聚焦镜对快慢轴方向分别聚焦,其原理如快慢轴准直。前者所用的透镜多,会造成光损失大,同时考虑到系统的简单性,选用分别聚焦的方法。为了使聚焦后各个口径的光束焦点位置一致,聚焦镜选用球差小的透镜类型。

[0029] 评价半导体激光器输出光束质量的参数,一般用光参量积(BPP):

[0030]  $BPP = w_0 \cdot \theta$ ,其中  $w_0$  是光束束腰的半径,  $\theta$  是远场发散角的半角。

[0031] 则光纤的光参量积  $BPP_{fiber} = d_0/2 \cdot NA$ ,  $d_0$  光纤芯径的直径,  $NA$  为数值孔径。

[0032] 一束光要完全进入光纤,必须满足三个条件:光束的截面半径要小于光纤纤芯的半径;光束的发散角的半角要小于光纤的数值孔径;叠加后光束的光参量积  $BPP_{total}$  小于光纤的光参量积  $BPP_{fiber}$ 。

[0033] 由于半导体激光器的光斑为矩形,要进入光纤必须满足

$$BPP_{total} = \sqrt{BPP_{slow}^2 + BPP_{fast}^2} \leq BPP_{fiber}$$

[0035] 为了使入射光最大比例地占有光纤纤芯,应尽量满足

$BPP_{fast} = BPP_{slow} = \frac{BPP_{fiber}}{\sqrt{2}}$ 。当一根光纤确定后,其慢轴方向和快轴方向的光参量积就大致确定了。慢轴的光参量积  $BPP_{slow}$  远大于快轴的光参量积  $BPP_{fast}$ ,为了不使用复杂昂贵的光束变换元件进行光束切割和重排,慢轴方向的 BPP 最大取  $\frac{BPP_{fiber}}{\sqrt{2}}$ 。而单个激光器快轴方向的 BPP 很小,一般通过多个激光器的光在快轴方向上叠加而成的,为了使快慢轴方向的光斑均衡,快轴叠加后两者的 BPP 应尽量相等,于是  $N = BPP_{slow}/BPP_{fast}$ ,快轴方向可叠加的激光器数为小于 N 的整数。实际运用时,由于在耦合过程中各个透镜存在像差,快慢轴的光参数积会变大,因此在初值选择时,快慢轴均取稍小于上述值。

[0036] 从上述可知,光束的耦合实质就是光束在快轴方向的叠加,在慢轴方向重合。为了实现光束在快轴方向上叠加,在不改变快轴方向光路的情况下,相邻激光器的发光点在快轴方向上就应存在一个高度差。为了让光功率密度更大,这个高度差应等于准直后快轴方向上的全宽。从减少能量损失的角度考虑,尽量少用光学元件改变光路,因此在其物理位置上产生一个这样的高度差。综合各个方面的考虑,将激光器放置在台阶状的底座上,是一个较好的选择。

[0037] 从耦合的效果来看,当各个光路的光程小,光路之间的光程相等时,光束发散小,耦合光斑能量分布均匀,耦合的质量好。因此在耦合同样数量的激光器数,合理地排列激光器的位置,可以使耦合的效果提高。

[0038] 由于半导体激光器输出光的发散角较大,不能直接进行传输,须先用快慢轴准直镜将光束的发散角减小,其准直遵从准直前后 BPP 不变的原则,即光束发散角减小的同时,光斑线宽变大。而又由于快慢轴方向的 BPP 相差很大,不能用一个准直镜对两个方向同时准直,因此采用两个母线相垂直的柱透镜对光束的快慢轴方向分别准直。

[0039] 为了让系统便于安装和调试,采用直角棱镜对光路进行 90° 偏折。偏转光轴后,

激光器和快慢轴准直镜物理特性（位置和大小）的要求降低，便于器件筛选和系统调试，它只须考虑器件对本光路是否适合，而不用担心对其他光路的影响，如器件尺寸太大对其他光路产生挡光，偏折等。直角棱镜尺寸的选择基于两个原则：快轴方向尽量小，慢轴方向上适当大。反射镜的厚度刚好等于准直后的光束快轴方向的全宽，相邻反射镜的距离为反射镜厚度，即间隔为零，这样既可以保证反射镜不挡光，又可以使叠加后快轴方向的能量集中，直角棱镜的直角边约大于光束准直后慢轴方向的全宽，可以减少慢轴方向能量的损失，获得高的效率。直角棱镜位置的选择基于同一衬底两侧相对激光器的光程相等原则，因此它位于两相对激光器的正中间。光束经中间直角棱镜反射后，可以有效地在快轴方向上叠加。

[0040] 叠加后的光斑快慢轴发散角一般不同，光斑呈矩形分布。与和光纤匹配的光斑相比，此时光斑快慢轴的发散角太小，而光斑太大，不能直接进入光纤，因此需用聚焦镜来均衡发散角和光斑的大小，其遵循 BPP 不变原则。根据所要进入的光纤的 NA 和纤芯半径和当前光斑的发散角和大小，来筛选聚焦镜，聚焦后光斑的尺寸和发散角均要小于光纤相应的参数。进入光纤的方法一般有两种：一是先用望远镜系统扩束，再用一个聚焦镜聚焦；一是直接用两个聚焦镜对快慢轴分别聚焦。考虑到此结构的紧凑性，在此采用快慢轴分别聚焦。

[0041] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白，以下结合实施例，对本发明进行进一步详细说明，应当理解，此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。

[0042] 实施例为 16 个半导体单管激光器耦合进纤芯半径为 100μm、NA0.22 的光纤中。

[0043] 设 C-mount 封装安装的半导体激光器单管的热沉块(11)的尺寸为 7mm×7mm×2mm，激光器单管(12)焊置位置如图 2 所示。为了便于更换，同一底座同侧的激光器不能重叠，因此在 Z 方向上相邻激光器的间隔取为 8mm，其安装位置如图 3 所示。半导体激光器单管可拆卸无损伤地放置在上下台阶底座的两侧。

[0044] 激光器单管的初始值设为：单管输出功率设为 5W；波长为 808nm；快轴方向线宽（半宽）为 0.5μm，发散角（半角）为 30°；慢轴方向线宽为 0.1mm，发散角为 4.5°。确定单管激光器慢轴方向  $BPP_{slow} = 7.875\text{mm. mrad}$ ，快轴方向  $BPP_{fast} = 0.2625\text{mm. mrad}$ ，理论上在快轴方向上可叠加 30 个单管，进入  $BPP_{fiber} = 11.137\text{mm. mrad}$  的光纤，即纤芯半径为 51μm、NA 为 0.22 的光纤。

[0045] 首先选择适当焦距的快轴准直镜(2)和慢轴准直镜(3)对光束进行准直。此实例中选用焦距为 0.9mm 的非球面柱镜对快轴方向进行准直，准直后的半宽约为 0.2mm，发散角半角为 0.2°。慢轴方向的准直镜的焦距选用 12mm，准直后的半宽约为 1mm，发散角半角为 0.55°。由于像差的影响，准直后快慢轴的光参量积均有所增大。

[0046] 为了不影响快慢轴准直效果的最短距离，激光器到直角棱镜的距离在此选用 15mm。直角棱镜的尺寸由准直后的光束确定，因此其厚度选为 0.4mm，其直角边选为 4mm。单管发出的光经快慢轴准直和反射镜偏折后的示意图如图 5 所示。为了使光在快轴方向上能叠加的更密集，忽略快轴方向发散角的影响，在 Y 轴方向上，各个相邻直角反射镜的间隔为零，中心位置相距为 0.4mm，即理论上光在 Y 轴方向（快轴方向）实现无缝隙叠加。

[0047] 为了在同样数量的激光器耦合情况下，获得更加紧凑的结构和更合理的光程，在一个台阶底座两侧同时放置半导体激光器，阶梯底座的形状如图 5 所示。确定台阶底座的

尺寸：台阶高度为准直后快轴方向的全宽，因此取为 0.4mm；台阶宽度为同侧同一底座相邻激光器的距离，在此取为 8mm；台阶底座在 X 方向的长度应为两侧激光器到反射镜反射面中心距离之和，取为 34mm；台阶底座在 Y 方向和 Z 方向的长度由实际情况而定。

[0048] 在一个阶梯底座上安置好半导体激光器、快慢轴准直镜和直角棱镜的示意图如图 6 所示，直角棱镜的斜边与台阶接触面相隔一定距离，采用内反射偏折光路，快轴准直镜可以直接粘在激光器单管上，从而使装调简便。考虑到采用两个同样的阶梯底座扣合时，分处在两个底座上相邻最近的光路在快轴方向无间隔叠加，为了使光路对称，此两个光路中间的直角棱镜的一条直角边重合，而斜边垂直。在每个底座上对应光路面，没有光路的一侧刻蚀掉一部分，以便能够容下另一个底座的相对应的准直镜。图 7 是采用两个阶梯扣合时激光器的排列方式。

[0049] 各个激光器的光经中间反射镜反射后，在快轴方向上叠加。由于各个透镜像差的影响，当采用 16 个激光器单管耦合后，其快轴方向线宽约为 3.5mm，发散角半角为 0.22°，慢轴方向线宽约为 1.2mm，发散角半角为 0.55°。相应的光参量积：快轴方向的  $BPP_1 = 13.2825\text{mm. mrad}$ ，慢轴方向的  $BPP_2 = 11.55\text{mm. mrad}$ ，可以看出，两者基本上相等。

[0050] 为了进 NA 为 0.22 的光纤，则经快慢轴聚焦后，两个方向的发散角半角均小于等于  $\arcsin(0.22) = 12.7^\circ$ 。由此分别计算出快轴聚焦镜和慢轴聚焦镜的焦距分别为：快轴方向  $f_1 = 3.45/\tan(12.7^\circ) = 15.31\text{mm}$ ，其理论上聚光斑半径为 0.05344mm；慢轴方向  $f_2 = 1.45/\tan(12.7^\circ) = 6.434\text{mm}$ ，其理论上聚光斑半径为 0.05615mm。由于存在像差的影响，聚光后光斑的参数为：快轴方向线宽为 0.08mm，发散角半角为 12.45°；慢轴方向线宽为 0.06mm，发散角为 12.6°。快轴方向的  $BPP_{fast} = 17.43\text{mm. mrad}$ ，慢轴方向的  $BPP_{slow} = 13.23\text{mm. mrad}$ ，则  $BPP_{total} = 21.88\text{mm. mrad}$ 。而半径为 100um、NA 为 0.22 的光纤的  $BPP_{fiber} = 22\text{mm. mrad}$ 。可看出  $BPP_{total} < BPP_{fiber}$ ，满足进光纤三个条件，此 16 个单管耦合光束恰好能进入此 200um 的光纤中，输出功率为 79.724W，由 Zemax 模拟，其转换效率达 99% 以上。

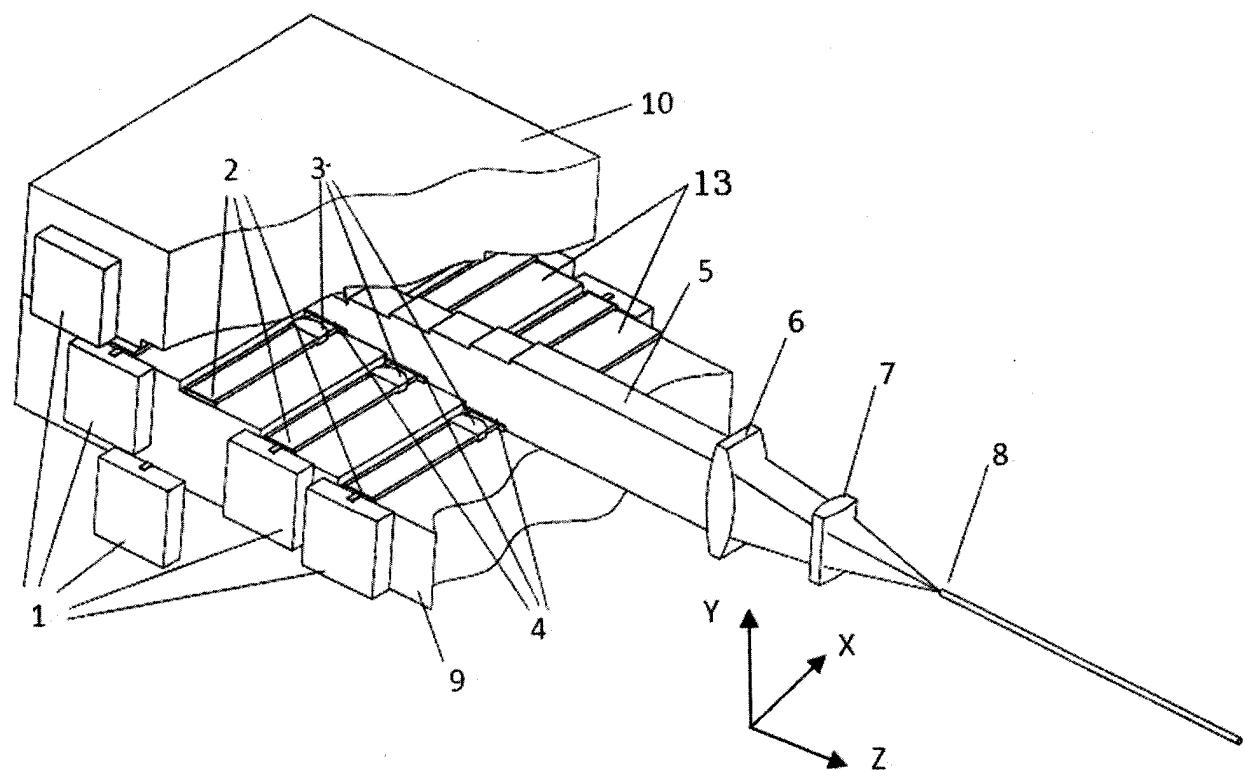


图 1

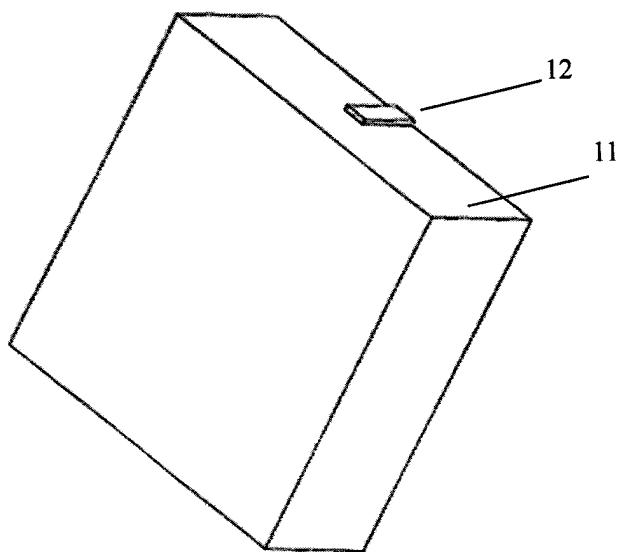


图 2

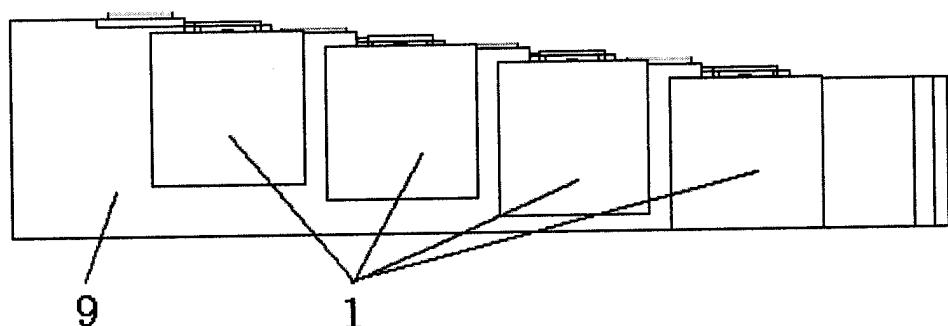


图 3

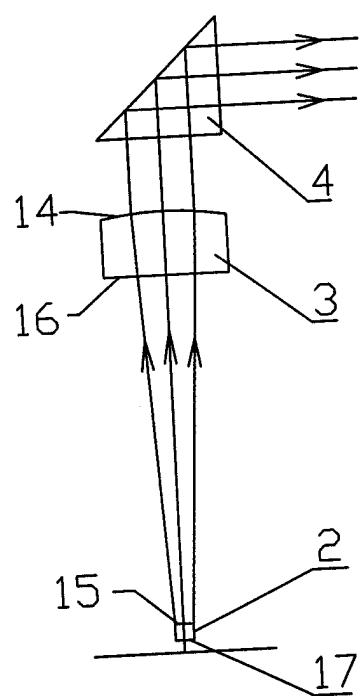


图 4

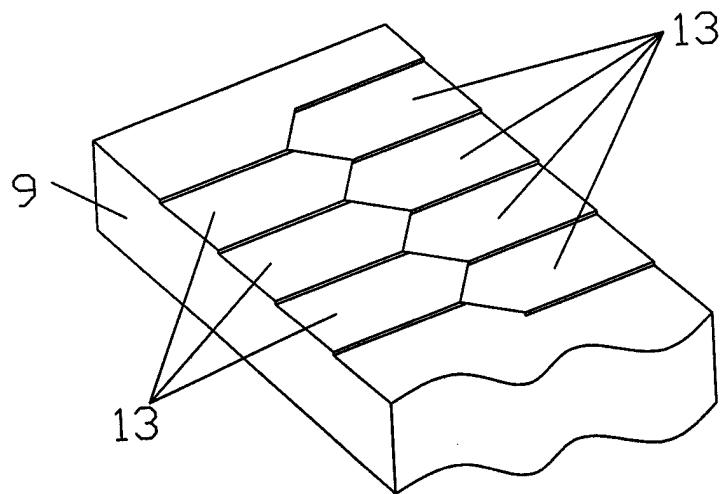


图 5

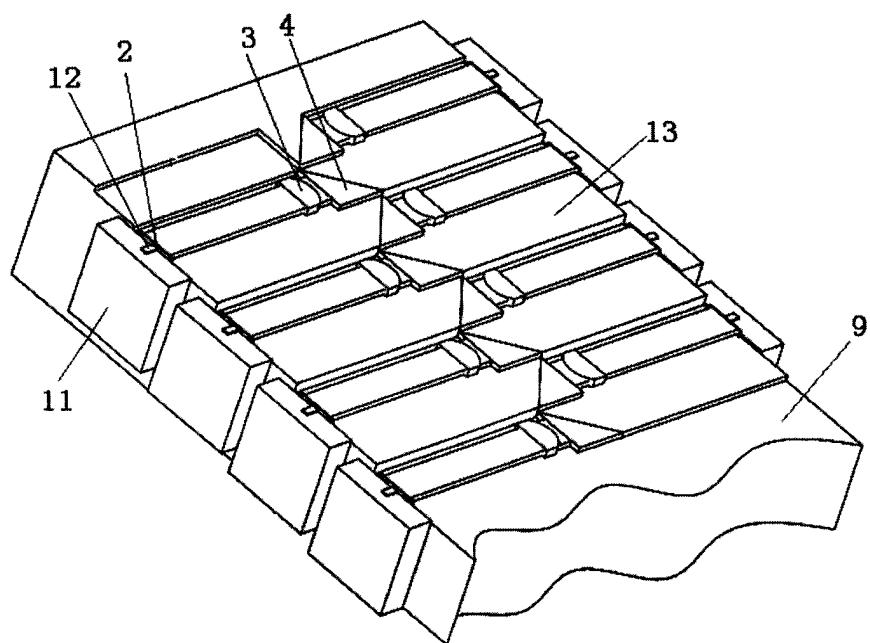


图 6

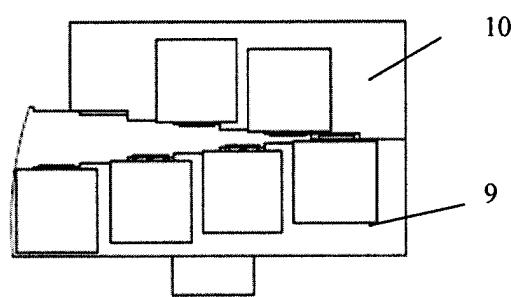


图 7