

## 高亮度绿光半导体激光器光纤耦合系统设计与仿真

丁兵<sup>1,2</sup>, 赵鹏飞<sup>1</sup>, 段程芮<sup>3</sup>, 娄博杰<sup>1,2</sup>, 林学春<sup>1\*</sup><sup>1</sup>中国科学院半导体研究所全固态光源实验室, 北京 100083;<sup>2</sup>中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049;<sup>3</sup>北京工业大学材料与制造学部激光工程研究院, 北京 100124

**摘要** 针对矩形阵列光束与光纤耦合的角度填充系数低, 以及未能充分利用光纤数值孔径的缺点, 提出密堆积阵列光束的光纤耦合方式以最大化角度填充系数, 从而提升光纤耦合的输出亮度。基于该排布方式设计无像差平行平板缩束装置, 相比于望远镜缩束系统, 该装置可保持光束发散角不变, 消除阵列光束之间的暗区, 改善组合光束的光束质量。仿真结果表明, 该装置可将 14 支功率为 1.5 W 绿光单管耦合进数值孔径为 0.15 和芯径为 105  $\mu\text{m}$  的光纤中, 获得 93.75% 的光纤耦合效率, 输出功率为 19.13 W, 对应亮度为  $3.125 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1}$ , 系统的总光-光传输效率达 91.10%。

**关键词** 激光光学; 半导体激光器; 绿光; 光束整形; 高亮度

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0501016

## 1 引言

绿光半导体激光器(LD)具有体积小、稳定性高和波长可调制等优点, 已被广泛应用于激光存储、激光医疗和激光显示等领域<sup>[1-5]</sup>。近年来, 绿光 LD 作为钛宝石激光器的泵源之一, 在超短脉冲激光领域越来越引起人们的关注。2017 年, 中国科学院西安光学精密机械研究所王向林等<sup>[6]</sup>使用了两个功率为 1.45 W 的绿光 LD 泵浦钛蓝宝石晶体, 获得输出能量为 232 mJ 的脉冲激光, 并指出增大绿光泵浦源的功率可进一步提高输出功率。然而, 相比于近红外波段的砷化镓基材料, 宽禁带氮化镓基材料在生长过程中极易产生位错和沟槽等缺陷, 这些缺陷会引起非辐射复合, 进而导致 LD 的发光效率和输出功率降低<sup>[7-8]</sup>。处于业内领先水平的日本制造商日亚化学生产的绿光 LD, 其单管功率只能达到 1.5 W<sup>[9]</sup>, 因此必须采用光束合束的技术来进一步提高输出功率。2020 年, 中国科学院半导体研究所 Miao 等<sup>[10]</sup>将多单管合束功率为 21.68 W 的绿光 LD 模块(耦合光纤芯径为 200  $\mu\text{m}$ , 数值孔径(NA)

为 0.22)作为 Ti:S 泵浦源, 获得的输出功率为 1.36 W, 该研究指出不仅需要高功率的绿光 LD 泵源提高输出功率, 高亮度的绿光 LD 泵源(可提升聚焦光束的瑞利长度)也是提升钛蓝宝石固体激光器输出功率的关键因素之一。目前, 文献[11-14]采用了空间或偏振等非相干合束的方法来提高绿光 LD 模块的输出功率, 但相关报道中的组合光束一般呈矩形阵列排布, 光束通过耦合透镜聚焦到光纤的角度填充系数小, 但这会浪费了部分角度空间。如果能够在该区域进行光束填充, 需要充分利用光纤的 NA 以进一步提升输出激光的亮度。

本文报道一种基于正六边形平面密堆积分布的光束阵列的非相干合束方法, 设计一个平行平板光束的缩束装置。该装置可在不改变光束发射角和不引入额外像差的条件下缩小光斑阵列的直径, 消除相邻发光单元之间的暗区。经过理论计算以及光学仿真验证, 该模块可以将 14 只功率为 1.5 W 且单偏振态的绿光单管耦合进芯径为 105  $\mu\text{m}$  和 NA 为 0.15 的多模光纤中, 光纤输出功率为 19.13 W, 对应亮度为  $3.125 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1}$ , 可为实现钛宝石激光器的

收稿日期: 2020-11-12; 修回日期: 2020-12-04; 录用日期: 2021-02-05

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0401804)

\*E-mail: xclin@semi.ac.cn

高亮度和高功率绿光 LD 泵源提供一条可能的途径。

## 2 LD 光纤耦合的基本参数

### 2.1 光纤输出亮度

当描述 LD 光纤耦合的过程时,采用光束参数积(BPP)来描述 LD 的光束质量更为方便<sup>[15]</sup>,BPP 可以定义为

$$x_{BPP} = \omega \cdot \theta, \quad (1)$$

式中: $\omega$  为光束的束腰半径; $\theta$  为远场发散的半角。由(1)式可知,BPP 只与  $\omega$  和  $\theta$  相关,与波长  $\lambda$  无关。在数学关系上,BPP 是光束衍射倍率因子  $M^2$  的  $\lambda/\pi$  倍<sup>[16]</sup>,因此 BPP 还可用来衡量不同波长激光束的聚焦效果。对于一定  $M^2$  的激光束,波长越短则聚焦效果越好。

激光源的亮度( $B$ )是激光在应用过程中的一个重要参数,可以同时反映激光的输出功率和光束质量。 $B$  与输出功率  $P$  和 BPP 之间的关系可表示为

$$B = \frac{P}{\pi^2 x_{BPP}^2}. \quad (2)$$

在相同的功率下, $B$  与 BPP 的平方成反比,BPP 值越小,光束质量越好,亮度也越高。对于光纤输出的光束而言,耦合光纤的芯径和数值孔径越小,则输出光束的亮度越高。理论上,在相同的功率下,对于芯径为  $105 \mu\text{m}$  和 NA 为 0.15 的光纤,其输出亮度是芯径为  $200 \mu\text{m}$  和 NA 为 0.22 的光纤的 7.8 倍。

### 2.2 光束进入光纤的角度填充系数

正六边形密堆积分布和矩形分布的光束组合阵列<sup>[12]</sup>在光纤耦合透镜像方主平面上的光斑分布情况如图 1 所示。角度填充系数(AFF):各子光束聚焦到光纤端面上对应的立体角之和与光纤接收立体角的比值,其中光纤接收立体角为光束阵列的外扩圆(以耦合镜主光轴为中心,以光轴到阵列光束边缘最远距离为半径)会聚到光纤端面上的立体角。当光纤耦合时,AFF 可以近似为图 1 耦合透镜像方主平面上的阵列光斑面积之和与其外扩圆面积之比,表达式为

$$x_{AFF} = \frac{\sum \Omega_{laser}}{\Omega_{circle}} = \frac{\sum S_{laser}/F^2}{S_{circle}/F^2} = \frac{\sum S_{laser}}{S_{circle}}, \quad (3)$$

式中: $\Omega_{laser}$  为光束阵列中每一个子光束对应的立体角; $\Omega_{circle}$  为阵列光束外扩圆的接收立体角; $S_{laser}$  为子光束在耦合透镜像方主平面上的光斑面积; $S_{circle}$  为阵列光束外扩圆在透镜像方主平面上对应的范围面积; $F$  为耦合透镜的焦距。由(3)式计算可知,正

六边形密堆积分布的光束组合阵列的角度填充系数为 77.78%,矩形分布的光束组合阵列的角度填充系数为 63.67%。需要说明的是,图 1(b)的矩形阵列光斑是一种理想近似情况,忽略了子光斑之间的间隙,而图 1(a)的子光斑很难实现圆对称,因此实际中的 AFF 值小于计算值。

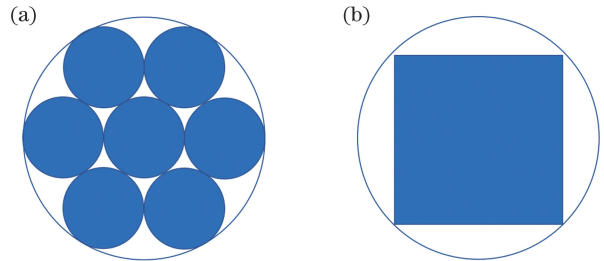


图 1 组合光束阵列在像方主平面上的光斑分布。

(a)密堆积阵列光斑分布;(b)矩形阵列光斑分布

Fig. 1 Spot distribution of composite beam array on main plane of image side. (a) Spot distribution of closest-packed array; (b) rectangular array spot distribution

## 3 光学设计

### 3.1 光纤耦合模块结构布局

根据 2.2 节的结论,设计的绿光光纤耦合模块如图 2 所示,其中 HR mirror 为高反射率镜。平面密堆积排布的 LD 光束可以最大化填充光纤的数值孔径,从而提升光纤耦合输出的功率和亮度。使用 14 支功率为 1.5 W 的绿光 LD 单管,每组 7 个置于正六边形的六个顶点和中心位置上,从而形成平面密堆积分布。绿光 LD 单管发出的光束经过快、慢轴准直镜(FAC、SAC)准直后成为一系列平行的椭圆光束,每组 7 个绿光单管的准直光束构成平行光束阵列,该光束阵列经过光束缩束的装置后可以朝着中心光束平移(径向平移),从而减少光束之间的间隔,在光束发散角保持不变的情况下消除光束之间

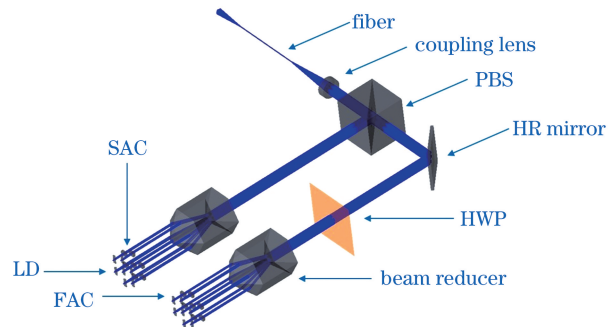


图 2 光纤耦合绿光 LD 模块的结构

Fig. 2 Structure of fiber coupled green light LD module

的暗区,形成密堆积。完成缩束后,一组光束经过半波片(HWP)后旋转  $90^\circ$ ,然后两组偏振方向垂直的光束经过偏振合束器(PBS)后合成一束光,最后经过耦合透镜聚焦进芯径为  $105\ \mu\text{m}$  和 NA 为 0.15 的光纤中。ZEMAX 非序列光线追迹分析结果表明,该模块的光纤输出功率可达 19.13 W,对应的输出亮度为  $3.125\ \text{MW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{Sr}^{-1}$ 。

### 3.2 快慢轴准直

光纤耦合模块中使用的绿光 LD 单管为 TO (Transistor Outline) 封装的边发射 LD,发射波长为 520 nm 的多模偏振激光束,发光面的尺寸为  $1\ \mu\text{m}\times 15\ \mu\text{m}$ ,距离 TO 管壳窗口 1 mm。LD 发光面的短边尺度极小,发射的光束接近衍射极限,发散角大(约为  $46^\circ$ ),称为快轴;与之垂直的发光面宽度大,其光束质量约为衍射极限的 4 倍,光束的发散角小(约为  $11^\circ$ ),称为慢轴。由于快、慢轴方向的光束质量差异较大,为了保证光束传输过程的光斑可控,需分别对 LD 的快、慢轴方向的光束进行准直。准

直过程中,快轴方向选用  $F=2.27\ \text{mm}$  和厚度为 1 mm 的非球面柱透镜(圆锥系数为  $-0.797$ ,物方截距为 1.612 mm,其大于 TO 管壳窗口距离),非球面柱透镜的准直可以有效减小大发散角光束的球差;慢轴方向选用  $F=10\ \text{mm}$ ,厚度为 2 mm 的球面柱透镜。当使用 ZEMAX 软件设置光源时,快轴方向设为高斯光束,慢轴方向设为超高斯因子  $H$  为 10 的光束<sup>[17]</sup>。准直后的光斑近似圆形,如图 3 所示。从图 3 可以看到,快轴方向的光斑直径为 2.20 mm,慢轴方向的光斑直径为 2.54 mm,光斑能量占总能量的 98%<sup>[16]</sup>。图 4 为单管准直后的光束发散角,准直后的光束参数如表 1 所示,其中  $\omega_{\text{fast}}$  和  $\omega_{\text{slow}}$  分别为准直后快、慢轴方向上的单管输出光斑半径, $\theta_{\text{fast}}$  和  $\theta_{\text{slow}}$  分别为快、慢轴方向上的远场发散半角, $x_{\text{BPP,fast}}$  和  $x_{\text{BPP,slow}}$  分别为准直后快、慢轴方向上单管输出光参数积。从表 1 可以看到,在快轴和慢轴上的发散角分别为 0.262 mrad 和 0.750 mrad。

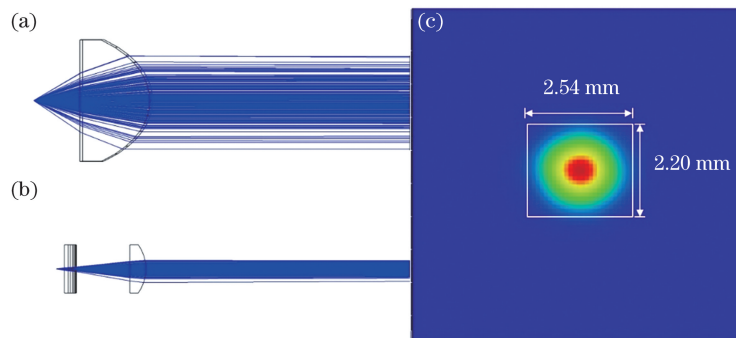


图 3 光束准直图。(a)快轴准直的光线追迹;(b)慢轴准直的光线追迹;(c)LD 准直后的输出光斑

Fig. 3 Light beam collimation diagram. (a) Ray tracing for fast axis collimation; (b) ray tracing for slow axis collimation; (c) output spot of LD after collimation

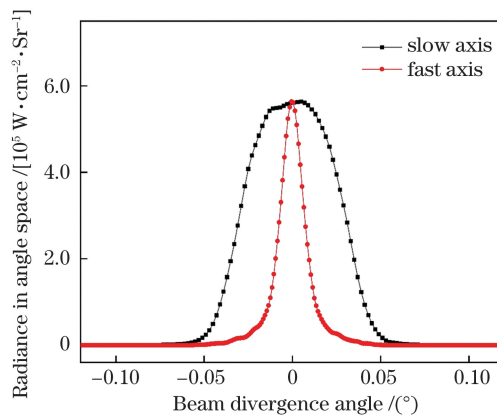


图 4 准直后的发散角

Fig. 4 Divergence angle after collimation

表 1 准直后单管的光束参数

Table 1 Beam parameters of single tube after collimation

$\omega_{\text{fast}}/\text{mm}$	$\omega_{\text{slow}}/\text{mm}$	$\theta_{\text{fast}}/\text{mrad}$	$\theta_{\text{slow}}/\text{mrad}$	$x_{\text{BPP,fast}}/(\text{mm} \cdot \text{mrad})$	$x_{\text{BPP,slow}}/(\text{mm} \cdot \text{mrad})$
1.100	1.270	0.262	0.750	0.288	0.953

### 3.3 光斑阵列缩束

因 TO 封装的绿光 LD 的固有尺寸会导致发光芯片之间存在 10 mm 的距离,不同单管输出的光束之间存在大片暗区,因此需要对光束进行缩束,使光斑紧密集中在轴心光束的周围。若使用传统的望远镜系统对光束进行缩束,仅能压缩光束尺寸而不能有效消除暗区,因此不能增大耦合聚焦的光束角度填充系数。依据传输过程中 BPP 值不变的原理,光束经过望远镜系统缩束后发散角将变大,同时望远镜系统的透镜会引入球差等额外像差,这会进一步破坏光束质量,不利于提高光纤耦合效率。

为了解决上述问题,设计了阵列光束缩束装置,结构如图 5 所示,工作原理和应用效果如图 6 和图 7 所示,该装置是由 6 块平行平板玻璃围成的空心六边棱柱。在仿真系统中,缩束装置的材质选用对可见光高透的 K9 玻璃,缩束装置的前、后表面镀膜反射率小于 0.05% 的减反膜以降低光学玻璃界面的反射损耗。镀膜参数可在 ZEMAX 软件中进行

设置,膜层仅反映光束通过光学器件后的透射或反射损耗,其对光线传输角度的影响极小,可忽略不计。对于每一块平行平板玻璃,光束的平移规则满足斯涅耳折射定律,径向平移距离  $D$  与玻璃板的锐角  $\alpha$ 、折射率  $n$  和长度  $L$  之间的关系为

$$D = \frac{1}{2}L \left( 1 - \frac{\sin \alpha}{\sqrt{n^2 - \cos^2 \alpha}} \right) \sin 2\alpha. \quad (4)$$

六边形顶点上的 6 只 LD 单管输出的准直光束经过缩束装置前、后两个平行平面折射后,完成径向平移,光束边缘与六边形中心轴上的 LD 单管输出光束的边缘相切。装置设计的  $\alpha = 45^\circ$ ,  $L = 31.62 \text{ mm}$ 。当入射波长为 520 nm 绿光时, K9 玻璃的  $n = 1.5197$ ,  $D = 7.50 \text{ mm}$ 。缩束装置在不改变单个 LD 输出光束参数的条件下完成了阵列光束的径向平移,极大地减小了光束之间的暗区。光束经过该缩束装置后,合束光束的发散角不变,但直径缩小,组合光束的 BPP 值降低 5.63 mm · mrad,这有利于耦合进数值孔径更小的光纤,从而提高模块的输出亮度。

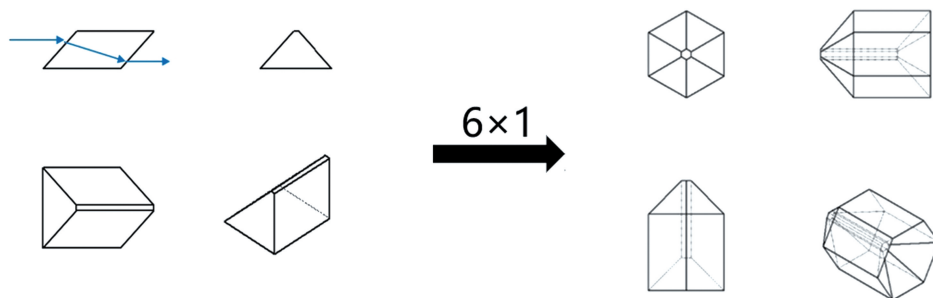


图 5 缩束装置的结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of bunch reduction device

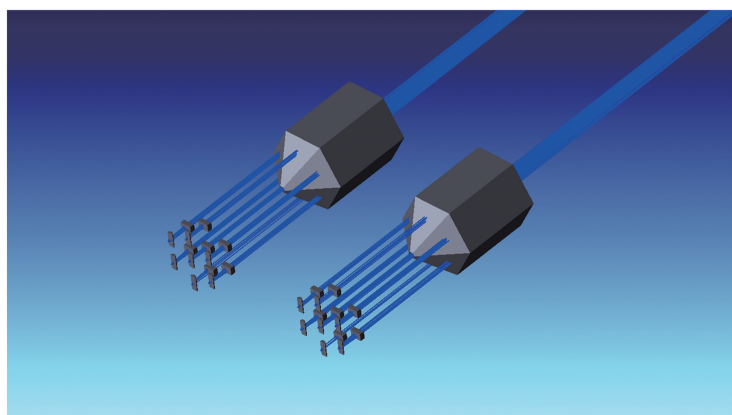


图 6 缩束效果示意图

Fig. 6 Bunch reduction effect diagram

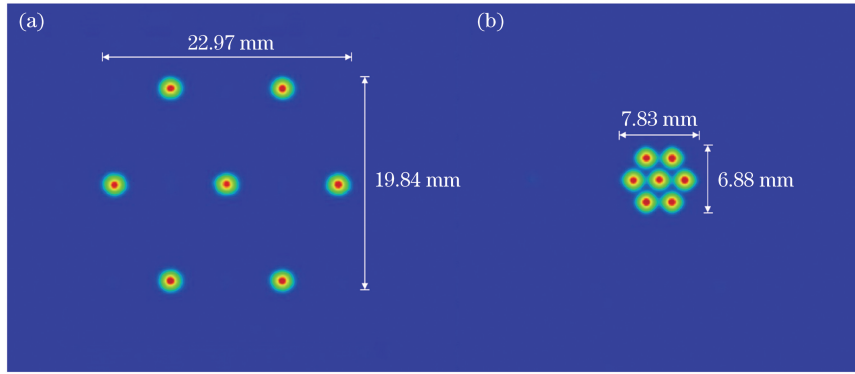


图 7 单组模块的光斑图。(a)单组模块缩束前输出光斑;(b)单组模块缩束后输出光斑

Fig. 7 Light spot pattern of single module. (a) Output light spot before bunch reduction of single group module; (b) output light spot after bunch reduction of single group module

### 3.4 光纤耦合

光纤耦合需要满足如下条件<sup>[18]</sup>

$$D_{\text{laser}} < D_{\text{fiber}}, \quad (5)$$

$$\theta_{\text{laser}} < \theta_{\text{fiber}}, \quad (6)$$

$$D_{\text{laser}} = 2F \cdot \tan \theta', \quad (7)$$

$$\tan \theta_{\text{laser}} = \frac{\sqrt{\omega_{\text{fast}}^2 + \omega_{\text{slow}}^2}}{2F}, \quad (8)$$

式中: $D_{\text{laser}}$ 为聚焦后光斑直径大小; $\theta_{\text{laser}}$ 为光束聚焦后远场发散半角; $D_{\text{fiber}}$ 为光纤芯径,值为 $105 \mu\text{m}$ ; $\theta_{\text{fiber}}$ 为 $NA = 0.15$ 的光纤对应的最大入射角,值为 $150.57 \text{ mrad}$ ; $\theta'$ 为快慢轴准直后光束发散半角中的最大值,值为 $0.750 \text{ mrad}$ 。光纤耦合的必要条件是聚焦后的光斑应小于芯径,且入射角小于光纤最大接受角。由(5)~(8)式可知,耦合聚焦镜的焦距必须满足

$$\frac{\sqrt{\omega_{\text{fast}}^2 + \omega_{\text{slow}}^2}}{2 \tan \theta_{\text{fiber}}} < F < \frac{D_{\text{fiber}}}{2 \tan \theta'}. \quad (9)$$

若组合光束未经过缩束装置直接耦合,则单管间的固有尺寸会导致组束光斑之间有大量空隙。快轴方向上的 $\omega_{\text{fast}} = 19.84 \text{ mm}$ ,慢轴方向上的 $\omega_{\text{slow}} = 22.97 \text{ mm}$ 。将缩束前的光斑数值代入(9)式, $F$ 值既要大于 $101.17 \text{ mm}$ 又要小于 $69.95 \text{ mm}$ ,显然无解。由此可知,组合光束在未经过缩束装置径向缩束的情况下无法耦合进芯径为 $105 \mu\text{m}$ 和 $NA$ 为 $0.15$ 的光纤中。

图 7 为组合光束光斑通过平行平板缩束装置后外围光斑的径向平移结果。从图 7 可以看到,光束暗区得到消除,快轴方向上的 $\omega_{\text{fast}} = 6.88 \text{ mm}$ ,慢轴方向上的 $\omega_{\text{slow}} = 7.83 \text{ mm}$ 。采用(3)式计算 AFF,该光束阵列通过耦合透镜会聚到光纤上的 AFF 值为 $63.80\%$ ,小于 2.2 节的理想近似值,这是由于光束的光斑非圆对称造成的,但该值仍然大于矩形阵列排布的情况。

将缩束后的光斑数值代入(9)式,得到耦合聚集镜的 $F$ 的取值范围为 $(34.35, 69.95)$ 。由此可知,耦合聚集镜的 $F$ 值应该大于 $34.35 \text{ mm}$ 且小于 $69.95 \text{ mm}$ ,缩束后的耦合聚集镜的 $F$ 有解。

考虑到缩小模块体积,仿真选择 $F = 35 \text{ mm}$ 的耦合聚集镜。为了减小聚焦光斑的弥散尺寸,耦合聚集镜采用消除球差的非球面镜进行设计。该非球面镜后表面为球面,前表面采用的面型为高阶偶次非球面,表达式为

$$z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)c^2 r^2}} + \sum_{k=1}^{\infty} a_{2k} r^{2k}, \quad (10)$$

式中: $z$ 为面矢高; $r$ 为径向坐标; $c$ 为曲率; $K$ 为圆锥系数; $k$ 为大于 0 的整数; $a$ 为各阶非球面系数。该非球面聚焦镜的表面设计参数如表 2 所示。

表 2 聚焦透镜的设计参数

Table 2 Design parameters of focusing lens

Surface	Radius of curvature /mm	Conic	$a_2$	$a_4$	$a_6$	$a_8$
1	21.168	$-5.187 \times 10^{-1}$	0	$-3.985 \times 10^{-6}$	$-6.695 \times 10^{-9}$	$-6.319 \times 10^{-12}$
2	-117.467	0	0	0	0	0

使用 ZEMAX 软件对整个系统的光线追迹进行仿真,结果如图 8 和图 9 所示。组合光束阵列通

过该非球面聚焦透镜(对于波长为 $520 \text{ nm}$ 的光束,增透膜的透过率设为 $99.5\%$ )后耦合进芯径为

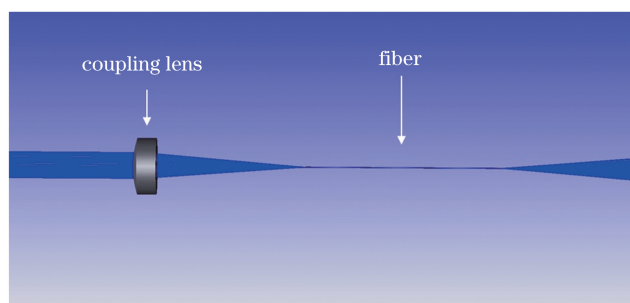


图 8 光纤耦合追迹图

Fig. 8 Ray tracing of fiber coupling

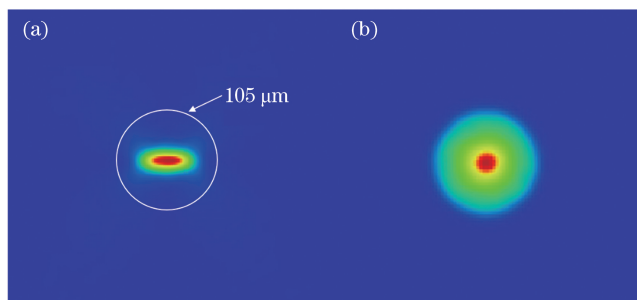


图 9 光纤耦合效果图。(a) 光纤端面的聚焦光斑；(b) 光纤输出的光斑

Fig. 9 Fiber coupling effect diagram. (a) Focusing spot on fiber facet; (b) spot of optical fiber output

105  $\mu\text{m}$  和 NA 为 0.15 的光纤中, 光纤的输出功率为 19.13 W, 光纤的耦合效率(进出光纤前后端面功率的比值)为 93.75%, 总的光-光传输效率(光纤输出功率与单管总功率的比值)达到 91.10%, 光纤耦合输出的亮度达到  $3.125 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1}$ 。

需要说明, 为了突出光束阵列与光纤耦合的 AFF 这一概念, 令 LD 快、慢轴准直后光斑之间的距离在近场中较接近, 这样光束阵列在快、慢轴方向的发散角差异大, 从而导致聚焦在光纤端面上的光斑对称性差, 占据光纤端面的尺寸小, 如图 9 所示。在实际应用中, 平面密堆积排布的子光束阵列可以由 2~3 个 LD 在快轴方向叠加而成, 这样就增大了聚焦光斑在光纤端面上的尺寸, 同时组合单管数量的增加也会进一步提高光纤耦合输出的亮度。

## 4 结 论

针对矩形阵列光束聚焦到光纤端面的角度填充系数低, 以及未能充分利用光纤数值孔径的缺点, 提出按平面密堆积排布的光束阵列的光纤耦合方式以最大化角度填充系数, 从而提升光纤耦合输出的亮度。基于该排布方式设计无像差平行平板缩束装置, 相比于传统望远镜缩束系统, 该装置可保持光束发散角不变, 消除光束暗区, 改善组合光束的光束质量。ZEMAX 仿真结果表明, 采用该缩束装置可将 14 支功率为 1.5 W 的绿光单管耦合进 NA 为 0.15 和芯径

为 105  $\mu\text{m}$  的光纤中, 从而获得功率为 19.13 W 的半导体绿光, 输出亮度为  $3.125 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1}$ , 对应的光纤耦合效率为 93.75%。下一步可以开展实验研究, 为 LD 泵浦钛蓝宝石固体激光器提供更优质的泵浦源。本文中的密堆积及缩束方法不限于绿光 LD, 可推广到任意波长的 LD 光纤耦合设计, 从而提高光纤耦合的角度填充系数, 进而提升光纤耦合的输出功率和亮度。

## 参 考 文 献

- [1] Akasaki I, Sota S, Sakai H, et al. Shortest wavelength semiconductor laser diode[J]. Electronics Letters, 1996, 32(12): 1105.
- [2] Xu H, Zheng Y G, Sun Y, et al. The application effect of high power green light semiconductor diode laser in the animal experimentation [J]. Laser Journal, 2006, 27(1): 89.  
徐红, 郑玉贵, 孙岩, 等. 高功率绿光半导体激光器的动物实验应用[J]. 激光杂志, 2006, 27(1): 89.
- [3] He F T, Feng X Q, Zhang D L, et al. High density optical storage property of cyanine dye by green laser [J]. Laser Technology, 2004, 28(5): 449-451.  
贺锋涛, 冯晓强, 张东玲, 等. 三甲川菁染料绿光高密度光存储研究[J]. 激光技术, 2004, 28(5): 449-451.
- [4] Gao W N, Xu Z Y, Bi Y, et al. Present development and tendency of laser display technology[J]. Strategic

- Study of CAE, 2020, 22(3): 85-91.
- 高伟男, 许祖彦, 毕勇, 等. 激光显示技术发展的现状和趋势[J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 85-91.
- [5] Sun M Y, Zhu J Y, Bi Y, et al. Color matching and real-time color temperature control in laser display [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0704001.
- 孙敏远, 朱建英, 毕勇, 等. 激光显示中颜色配比与实时色温控制研究[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0704001.
- [6] Wang X L, Hu X H, Xu P, et al. Ti: sapphire femtosecond pulses pumped directly by green diode lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(7): 0701002.
- 王向林, 胡晓鸿, 徐鹏, 等. 绿光半导体激光器直接抽运的钛宝石飞秒脉冲[J]. 中国激光, 2017, 44(7): 0701002.
- [7] Duff A I, Lymperakis L, Neugebauer J. Understanding and controlling indium incorporation and surface segregation on  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  surfaces: an ab initio approach[J]. Physical Review B, 2014, 89(8): 085307.
- [8] Liang F, Zhao D G, Jiang D S, et al. Influence of optical field distribution on GaN-based green laser diodes[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0701018.
- 梁锋, 赵德刚, 江德生, 等. 光场分布对 GaN 基绿光激光器的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0701018.
- [9] NICHIA corporation. Laser diode [EB/OL]. [2020-11-11]. <http://www.nichia.co.jp/en/product/laser.html>.
- [10] Miao Z W, Yu H J, Zhang J Y, et al. Watt-level CW Ti: sapphire oscillator directly pumped with green laser diodes module[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(5): 247-250.
- [11] Clarkson W A, Hanna D C. Two-mirror beam-shaping technique for high-power diode bars [J]. Optics Letters, 1996, 21(6): 375-377.
- [12] Liu L N, Gao X, Zhang X L, et al. Fiber coupling module of high brightness and high power semiconductor laser [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2018, 39(2): 196-201.
- 刘力宁, 高欣, 张晓磊, 等. 高亮度大功率半导体激光器光纤耦合模块[J]. 发光学报, 2018, 39(2): 196-201.
- [13] Zhao P, Wang Z, Yu H, et al. 12-W continuous-wave green output from a 200- $\mu\text{m}$  fiber-coupled diode laser based on TO-can packaged emitters [J]. Applied Optics, 2018, 57(9): 2263-2267.
- [14] Qi Y F, Zhao P F, Wu Y L, et al. Design of 20 W fiber-coupled green laser diode by ZEMAX [J]. Journal of Semiconductors, 2017, 38(9): 096002.
- [15] Bachmann F, Loosen P, Poprawe R. High power diode lasers [M]. New York: Springer, 2007: 121-125.
- [16] Wang B H, Jiang M H, Hui Y L, et al. Improving coupling efficiency of optical fiber for high-power laser beam [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(2): 195-199.
- 王宝华, 姜梦华, 惠勇凌, 等. 大功率固体激光器高效率光纤耦合[J]. 中国激光, 2008, 35(2): 195-199.
- [17] Coluccelli N. Nonsequential modeling of laser diode stacks using ZEMAX: simulation, optimization, and experimental validation [J]. Applied Optics, 2010, 49(22): 4237-4245.
- [18] Zhou C, Zhao P F, Yu H J, et al. Design of a 36-W fiber-coupled green laser diode by Zemax [J]. Results in Physics, 2018, 11: 219-222.

## Design and Simulation of High Brightness Fiber Coupling System of Green Laser Diodes

Ding Bing<sup>1,2</sup>, Zhao Pengfei<sup>1</sup>, Duan Chengrui<sup>3</sup>, Lou Bojie<sup>1,2</sup>, Lin Xuechun<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of All-Solid-State Light Sources, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100083, China;

<sup>2</sup>College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Science, Beijing, 100049, China;

<sup>3</sup>Institute of Laser Engineering, Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing, 100124, China

### Abstract

**Objective** In the field of ultrashort pulse laser, green laser diodes (LDs) as the pump source of Ti: sapphire laser have received increasing attention. It has been reported that increasing the power of the green laser-pumping source

can further improve the output power of Ti: sapphire lasers. However, compared with gallium arsenide-based materials in the near-infrared band, gallium nitride-based materials with a wider bandgap can radiate green light and are prone to produce defects in the growth process, which reduce the radiation efficiency and output power. The maximum power of a single LD commercially available is 1.5 W. Thus, it is necessary to use a beam combining technology to improve the output power. Presently, the incoherent beam combining methods, such as spatial or polarized combination, are mostly used to improve the output power of LD modules. However, it is found that the combined beam, in most cases, is a rectangular beam array. When such a beam is focused by a coupling lens, the angular filling factor (AFF) is low (AFF is defined in Section 2.1), resulting in wasting part of the angle space. If the beam filling can be performed in this region, the brightness of the fiber output can be improved further. The brightness of the pump source is also the key factor to increase the output power of the titanium sapphire laser. This study proposes a method for increasing the AFF to fully use the angle space by combining beams in a closest-packed structure. Based on the proposed method, a high-brightness fiber-coupled green LD module is demonstrated using ZEMAX.

**Methods** To solve the problem of low AFF and the inability of the numerical aperture of a fiber to be fully used when the beam in a rectangular array is coupled into the fiber, we propose to arrange the beams according to a closest-packed structure. Based on this arrangement, we design a high-brightness fiber-coupled module of green LDs. First, we divide 14 1.5-W green LDs into two groups of 7 each and placed them on the six vertices and centers of the regular hexagon to form a dense structure. Then, the beams emitted from green LDs are collimated, respectively, by the fast and slow axis collimators to form a series of parallel beams. Afterward, the beams at the vertices are moved toward the center beam through a custom-designed beam reducer. Thus, the dark area between the beams can be eliminated while the beam divergence angle is constant. Second, beams emitted from one of the two groups pass through a half-wave plate, and the polarization direction is rotated  $90^\circ$ , then two groups of beams with perpendicular polarization direction are combined into a beam through a polarization beam combiner. Finally, the beam is focused through an aspheric lens into a fiber with a core diameter of  $105\ \mu\text{m}$  and a NA of 0.15.

**Results and Discussions** After collimation, the output beam of LD is approximately circular symmetry (Fig. 3). The divergence angles in the fast and slow axes are 0.262 and 0.750 mrad, respectively (Table 1), which can meet the design requirements. Then, the combined beam passes through the beam reducer and eliminates the dark area between the beams. The combined beam diameter in the fast and slow axis is 6.88 and 7.83 mm, respectively (Fig. 7). When the beam is coupled into an optical fiber, the AFF is calculated to be 63.80%, which is higher than that of the rectangular beam (Eq (3)). The simulation results show that the power coupled out of the fiber is 19.13 W—corresponding to a brightness of  $3.125\ \text{MW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{Sr}^{-1}$ —and the fiber-coupling efficiency is 93.75%. Notably, to describe the concept of the AFF clearly, we deliberately collimate the output of the LD into an approximate circular spot in the near field, and it result in an asymmetry of the spot focused on the facet of the fiber in Fig. 9. The asymmetry can be improved in practical applications by combining multiple beams into a circular beam, replacing the subspot in Fig. 7.

**Conclusions** In summary, we propose a design of an optical fiber coupling module based on the closest-packed structure of combined beam array. It can fully use the numerical aperture of fiber and improve beam brightness. The simulation shows that 14 1.5-W LDs can be coupled into an optical fiber with a numerical aperture of 0.15 and core diameter of  $105\ \mu\text{m}$ , and a total power of 19.13 W can be obtained with an output brightness of  $3.125\ \text{MW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{Sr}^{-1}$ —corresponding to a fiber-coupling efficiency of 93.75%. In the future, experiments should be performed to provide a better pumping source for Ti: sapphire solid-state lasers.

**Key words** laser optics; laser diodes; green light; beam shaping; high brightness

**OCIS codes** 220.2740; 140.2020; 140.3298