

# 大口径激光二极管阵列端面抽运耦合系统设计模拟

段文涛 徐美健 蒋新颖 蒋东宾 王 芳 於海武

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 根据光线追迹原理,研究用于端面抽运的大面阵激光二极管(LD)抽运源的耦合系统设计。结合当前大口径激光二极管阵列常用的空心导管型耦合系统,分别从耦合效率、抽运强度分布、抽运光传输等方面,讨论大口径激光二极管阵列耦合系统的一般设计准则,提出了将激光二极管阵列单元平面排布改为球面排布的办法。针对 100 kW 激光二极管阵列,将子阵列作球面排布后,仅用一空心导管来汇聚抽运光,这种设计获得了传输性能优良的大区域均匀分布的抽运场,抽运场起伏小于 5%,抽运强度大于 20 kW/cm<sup>2</sup>,耦合效率 98%,有效抽运区域内效率达 90%。

**关键词** 激光技术; 激光二极管; 空心导管; 光线追迹

**中图分类号** TN243 **文献标识码** A

## Design and Simulation of End-Pumped Coupling System for Large Aperture Laser Diode Arrays

Duan Wentao Xu Meijian Jiang Xinying Jiang Dongbin Wang Fang Yu Haiwu

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** Based on the ray tracing method, the design of coupling system for large aperture laser diode (LD) arrays applied in end-pumped solid state laser was investigated systematically. Combining the current hollow duct coupling system for large aperture LD arrays, we discuss the common rules in designing coupling system for large aperture LD arrays from the coupling efficiency, energy distribution and propagation characteristics. Also, a new way to predigest the elements of coupling system for large aperture LD arrays by arranging small arrays spherically was introduced. For 100kW LD arrays, using only one hollow duct we obtained excellent results with large uniform pump field by arranging small arrays spherically, and the intensity was more than 20 kW/cm<sup>2</sup> with fluctuation less than 5%. The total coupling efficiency is 98%, and around 90% of energy was contained within the effective area of gain media.

**Key words** laser technique; laser diode; hollow duct; ray tracing

## 1 引 言

近年来,随着激光二极管(LD)功率的提高和成本的下降,激光二极管抽运的固体激光器(DPSSL)特别是高功率 DPSSL 相关研究得到迅速发展。与传统闪光灯抽运的固体激光器相比,DPSSL 具有高效率、高功率、寿命长、体积小等显著优点,因此激光二极管取代传统闪光灯成为固体激光器抽运源已成大势所趋。在惯性约束聚变(ICF)和惯性聚变能(IFE)研究领域,DPSSL 技术的进步也给新一代惯性聚变激光驱动器研究指明了方向。目前激光二极管阵列的发光强度只有 1 kW/cm<sup>2</sup> 左右,远远不能满足产生大能量激光所需的每平方米数千瓦至数十千瓦的高抽运强度要求,因此研究人员设计了很多种耦合聚光方式,包括组合透镜、光纤耦合、微透

镜阵列、实心透镜导管等<sup>[1~3]</sup>,这些耦合方法的共同缺陷是难以用作大口径高功率激光二极管面阵的抽运光耦合,而惯性约束聚变和惯性聚变能激光装置的基础研究平台所需激光二极管抽运源总强度也达几十至数百千瓦以上<sup>[4,5]</sup>,并且对入射至增益介质的抽运光束要求比小型 DPSSL 更高,这些都对抽运光的汇聚传输系统设计提出了新的挑战。当前,普遍采用透镜结合导管或者空心导管直接汇聚大面阵的抽运光至激光介质的端面抽运结构<sup>[6,7]</sup>,如美国 Mercury 装置、法国 Lucia 装置等惯性聚变能激光驱动器研究平台<sup>[8,9]</sup>。它们的基本单元均为空心导管,这类耦合系统具有结构简单稳定、耦合效率高、有效抽运区域大、易获得强度均匀的抽运分布等特点,能够满足大型激光驱动器的相关要求。本文

以此为背景,研究端面抽运方式工作的大口径高功率激光二极管阵列抽运光耦合系统。

## 2 光线追迹原理

耦合系统的设计是基于几何光学的光线追迹法。光源发出的光线经空心导尿管壁的数次反射后射出耦合系统,最后到达激光介质。整个传输过程中,光线的下一反射点位置坐标均可从上一位置推导得出。图1为空心导管耦合系统的光线传输过程示意图,图中 $2H$ 和 $2h$ 分别是系统的光线入口和出口大小, $L$ 为导管长度, $\alpha$ 是导管收缩角(均为正值); $(x_0, y_0)$ 为激光二极管面阵上光线的起始位置, $\beta$ 为光线与光轴 $x$ 的夹角,是光线的起始角,当入射光线对光轴逆时针方向旋转时 $\beta$ 为正,反之为负<sup>[7]</sup>。

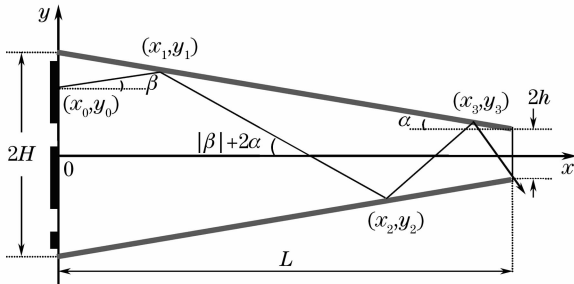


图1 光线追迹原理示意图  
Fig.1 Sketch of ray tracing

当 $\beta$ 为正时,光线从 $(x_0, y_0)$ 位置出射后到达 $(x_1, y_1)$ 处,即第一个反射点处,则

$$\tan \beta = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}, \quad (1)$$

$$\tan \alpha = \frac{H - y_1}{x_1 - x_0}. \quad (2)$$

光线从 $(x_1, y_1)$ 传输到 $(x_2, y_2)$ 处,则有

$$\tan(\beta + 2\alpha) = \frac{y_1 - y_2}{x_2 - x_1}, \quad (3)$$

$$\tan \alpha = \frac{H + y_2}{x_2 - x_0}, \quad (4)$$

递推得出,光线第 $n$ 次反射时相关位置关系为

$$\tan[\beta + 2(n-1)\alpha] = (-1)^{n-1} \frac{y_n - y_{n-1}}{x_n - x_{n-1}}, \quad (5)$$

$$\tan \alpha = \frac{H + (-1)^n y_n}{x_n - x_0}, \quad (6)$$

(1)式~(6)式中, $\alpha, \beta$ 均为已知条件,其中, $\alpha = \arctan[(H-h)/L]$ 。整理(5)式、(6)式就可以得出第 $n$ 次反射时反射点 $(x_n, y_n)$ 位置,也能得出光线在导光管内的反射次数。而 $\beta$ 为负值时推论过程与上面类似,不再赘述。

由推导过程可得到该光线在空心导管中的反射次数 $n$ ,还得到一个重要的关系式,即经过第 $n$ 次反射出射后,光线与光轴的夹角为

$$\varphi = \beta + 2n\alpha. \quad (7)$$

## 3 导管型耦合系统设计

目前用于惯性聚变能基础平台研究的激光二极管面阵在几十千瓦以上,如Mercury系统放大器的单面阵功率达80 kW,口径约 $25 \text{ cm} \times 7 \text{ cm}$ <sup>[4]</sup>, Lucia装置单面阵功率260 kW,口径约 $34 \text{ cm} \times 13 \text{ cm}$ <sup>[9]</sup>,对这种大口径高功率面阵的抽运光耦合,空心导管型耦合系统是最佳选择。

导管型耦合系统的结构一般含聚焦透镜加锥形空心导管型和无透镜空心导管型,基本单元是一段锥形空心导管,它由各种材质的平板组合而成,一般用抛光铝板或者钢板为基底,抛光面镀金或者银等高反射率金属膜;有时为改善抽运分布的均匀性,在导光锥出口续接一段矩形平行导管,也称匀束器。因此,导管型耦合系统最多含透镜、锥形导管、平行导管三部分,结构极其简单,成本低,这对大型激光装置非常有益。

### 3.1 耦合系统三要求

作为大口径激光介质所需的抽运光耦合系统,它应满足耦合效率高、传输性能好、抽运光分布均匀等要求。目前市售准直后的激光二极管面阵的全发散角典型值为 $1^\circ$ (快轴方向)和 $10^\circ$ (慢轴方向),而金属反射膜对于光线大角度入射的敏感性低,因此可将该光线的耦合效率定义为 $\eta = T \times R^n$ , $T$ 为耦合透镜透射率, $R$ 为反射板的平均反射率, $n$ 是反射次数。由于大部分光线都会被空心导尿管壁反射数次,故反射面的反射率对耦合效率影响最大,在抽运用激光二极管波段800~980 nm范围内,目前国内的镀金和银反射膜的零度反射率能达97%,掠入射时反射率大于98%,因工艺水平限制近期难以提高。为提高效率,只能设法减少光线的反射次数来减少反射板对抽运能量的吸收。激光二极管bar条经准直后快轴光线的发散角可至 $1^\circ$ 以下,因此可将其视作平行光来处理,通过聚焦或者改变光源排布等方法可使快轴方向的大部分光线反射1次或者两次甚至不经反射直接至增益介质;而慢轴方向 $10^\circ$ 的发散角远大于快轴,不能作为平行光处理,故该方向上光线的反射次数多于快轴方向,因此耦合系统设计中的重点是如何解决慢轴方向光线的缩聚传输。

在端面抽运结构的惯性约束聚变和惯性聚变能

放大器单元中,因储能的需要,增益介质厚达厘米量级以上,如 Mercury 装置的激光放大器共 7 片 Yb:S-FAP 晶体,总厚度达 5.25 cm,它采用两端抽运结构,每端抽运光射出耦合系统后的传输距离约 3 cm<sup>[8,10]</sup>;对于常用的端面背抽运放大器,抽运光进入介质前要先经过一段水层及防护玻璃层,则经过耦合系统射出的抽运光自由传输距离也在 1 cm 以上。因此,保证抽运光线在有效传输距离内均匀不变很重要,决定抽运光传输性能的关键在于控制光线出射角  $\varphi$ ,如果  $\varphi$  较大,光线离开耦合系统后迅速发散,这极大降低了一定传播距离内的抽运强度分布的一致性,增益介质有效区域内的抽运强度也变小。由 (7) 式可知, $\varphi$  值的大小取决于反射次数  $n$  和收缩角  $\alpha$ ,减小  $n$  和  $\alpha$  即可有效控制发散角  $\varphi$ 。

由于在慢轴方向一般选择较小的收缩角  $\alpha$ ,慢轴光线经过多次反射后抽运光的截面分布能得到匀化,因此慢轴方向分布基本均匀。而快轴方向因其近似为平行光线,用透镜虽能减小快轴光线的反射次数,但由于抽运功率密度的要求导致快轴方向阵列口径较大,相应的大口径透镜的像差影响明显,导致耦合系统出口光线分布不易均匀,并且透镜厚度较大,散热困难,需改作菲涅耳透镜或者非球面透镜,这又带来成本和加工上的困难,对这种问题的解决方法之一是在导光锥出口续接一段平行导光管来匀化快轴方向光线,但均匀性得到改善的同时耦合效率也会随之下降。在目前平面封装的激光二极管面阵功率密度低的现实面前,Mercury 的研究人员另辟蹊径,将该装置的 640 kW 阵列的快轴方向改用“V”槽结构封装,这种特殊的激光二极管封装结构提高了光轴方向上的抽运功率密度,也意味着减小了面阵快轴方向尺寸,对抽运分布的均匀性很有利<sup>[11]</sup>。对均匀度的衡

量是以抽运光有效区域内的近场调制度(不均匀性)来定义的,近场调制度  $\Delta g$  定义为

$$\Delta g = \frac{E_p - (E_p + E_v)/2}{(E_p + E_v)/2} \quad (8)$$

式中  $E_p$ 、 $E_v$  分别是指峰、谷能量值。

### 3.2 主要参量间关系

慢轴方向  $n$  和  $\varphi$  对耦合效率及光线传输影响最大,而对导管型耦合系统来说,慢轴方向的缩束比决定了  $n$  和  $\varphi$  的大小。激光二极管慢轴全发散角取  $10^\circ$ ,空心导管长 300 mm,对  $\beta=5^\circ$  的边缘光线进行计算,研究缩束比对反射次数  $n$  和出射光线发散角  $\varphi$  的影响(如图 2)。

由图 2 可知,对于给定长度的空心导管,其慢轴方向缩束比与收缩角  $\alpha$  呈正比关系,与边缘光线的反射次数为指数关系,与发散角  $\varphi$  也呈指数关系。缩束比越小,边缘光线的反射次数  $n$  与收缩角  $\alpha$  越小,则出射光线发散角  $\varphi$  越小。在  $L=300$  mm,缩束比在 3 以内时, $n=5\sim 6$ , $\varphi < 18^\circ$ ,设此时  $R=98\%$ ,则此光线的耦合效率  $\eta \geq 88.6\%$ ,因光线角度的高斯分布,大部分光线出射角  $\beta$  小于  $5^\circ$ ,所以大部分非边缘光线反射次数小于 6,总耦合效率大于  $88.6\%$ ,出射角  $\varphi$  也远小于  $18^\circ$ 。将  $18^\circ$  的高斯角换算成半高宽角大约为  $10^\circ$ ,用高斯光中心能量的一半的半高角来评估其传输性比  $1/e^2$  定义的高斯角更有普遍意义,当光线以  $10^\circ$  射出耦合系统后,自由传输 10 mm 的空间偏移量仅 1.7 mm,这种偏移对已均匀分布的抽运光影响并不大;当缩束比逐渐增大时, $\varphi$  与  $n$  值以指数增加,光线将迅速发散严重影响传输效率。具体缩束比大小由光线射出耦合系统后需要传输的距离决定,一般慢轴方向缩束比在 3 以内就能获得较好的传输效果。

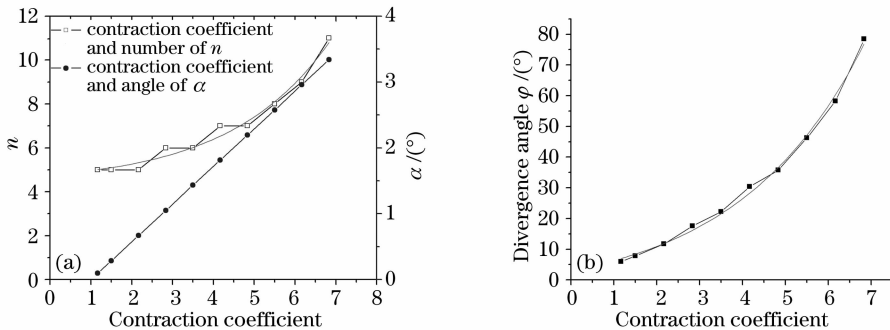


图 2 (a) 缩束比与收缩角  $\alpha$  及反射次数  $n$  关系, (b) 缩束比与出射角  $\varphi$  关系

Fig. 2 (a) Relationship between contraction coefficient and angle of  $\alpha$ , and number of reflection, (b) relationship between contraction coefficient and divergence angle of  $\varphi$

### 3.3 耦合系统一般性设计准则

大口径端面抽运耦合系统的设计关键是慢轴方向减小收缩角  $\alpha$  与反射次数  $n$ , 快轴方向需利用快轴发散角极小的特点提高光源抽运密度或者匀化处理。一般空心导管型耦合系统设计满足: 1) 慢轴方向收缩比不能过大, 一般在 3 倍以下, 此时光线出射角大多在十几度以内, 光线能满足传输要求; 2) 快轴方向选择相应透镜或者设法增加占空比等方法来实现,  $L$  长度较大时需加平行导管以匀化抽运分布; 3) 耦合系统在设计前先考虑光源阵列排布, 结合光源阵列排布和传输距离选取合适的导光锥口径及长度; 4) 导光管壁反射率尽可能高, 其材料选取高导热率且不易变形的金属材料, 必要时要对其强制冷却。

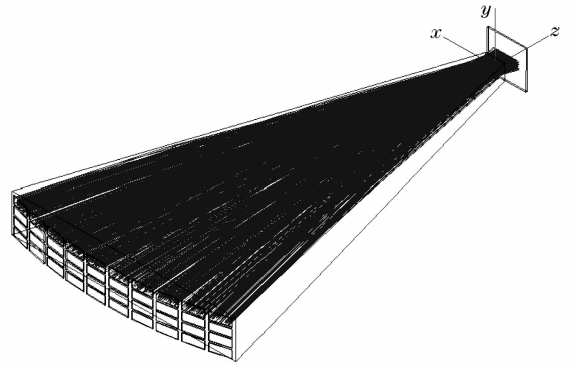


图 3 100 kW 激光二极管阵列耦合系统结构示意图  
Fig. 3 Arrangement of 100 kW laser diode arrays and coupling system

## 4 100 kW 面阵耦合系统模拟

### 4.1 系统结构

根据耦合系统的一般性设计准则, 设计了

100 kW 激光二极管面阵的耦合系统, 并做相应模拟计算。该系统利用阵列快轴光线优良的准直性能, 采用快轴方向与介质尺寸相当的激光二极管阵列, 改变常见的平面排布为球面排布(如图 3), 使得每个阵列几乎以平行光线直接入射至介质, 以期简化

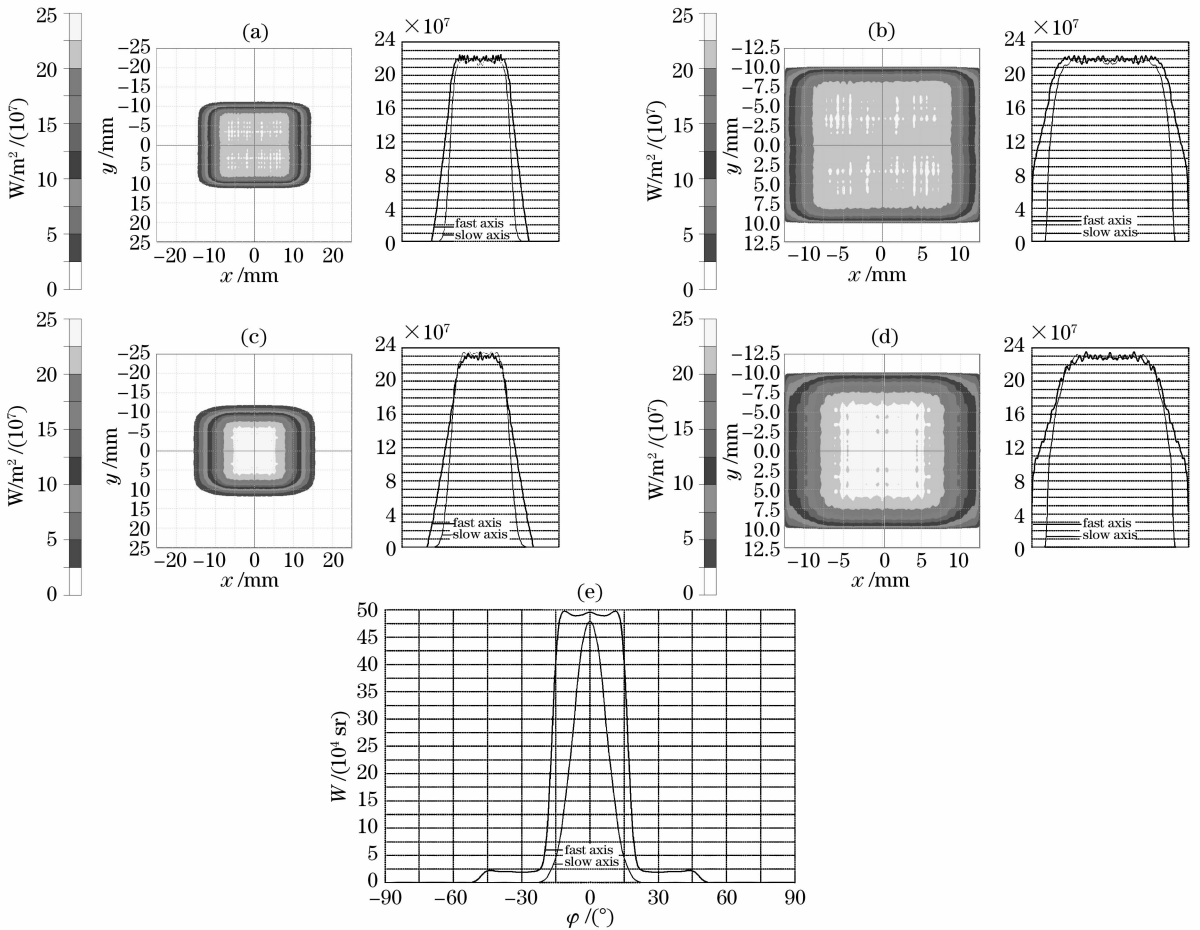


图 4 模拟结果。(a) 距系统出口 10 mm 处抽运分布, (b) 10 mm 处有效区域内分布, (c) 距系统出口 15 mm 处截面分布, (d) 15 mm 处有效区域内分布, (e) 出射光线角度分布统计

Fig. 4 Simulation results. (a) Full pump field at 10 mm, (b) distribution in area of gain media at 10 mm, (c) full pump field at 15 mm, (d) distribution in area of gain media at 15 mm, (e) range of  $\varphi$  in fast and slow axis

系统结构,获得较好的耦合效果。

二极管快慢轴高斯发散角分别取  $1^\circ$  和  $10^\circ$ ,单 bar 条峰值功率 150 W,每个阵列含 17 个 bar 条,面阵共 680 个 bar 条,总功率 100 kW。阵列呈  $10(\text{快轴}) \times 4(\text{慢轴})$  排列,快轴方向的 10 个阵列排成球形,球心至耦合系统出口中心。耦合系统仅有一个矩形导光锥,抽运光入口口径 290 mm(快轴)  $\times$  50 mm(慢轴),出口大小 25 mm(快轴)  $\times$  20 mm(慢轴),慢轴方向缩束比 2.5:1,导管总长度 480 mm,管壁反射率 98.3%,介质的有效抽运区大小 25 mm(快轴)  $\times$  20 mm(慢轴)。

#### 4.2 模拟结果

用光线追迹软件 TRACEPRO 对结构模拟计算,结果如图 4 所示。由图 4 可以得出抽运光射出耦合系统后在空气中自由传输 10 mm 和 15 mm 时,抽运光截面分布参量结果,如表 1 所示。

表 1 模拟结果

Table 1 Simulation results

Transmission distance from exit /mm	10	15
Pump field(fast axis) $\times$ (slow axis) /mm	20 $\times$ 20	18.5 $\times$ 18.5
Total coupling efficiency /%	98.2	98.2
Efficiency in the effective area /%	90.5	86.4
Fluctuation $\Delta g$ /%	4.5	4.5
Intensity /( $\text{kW}/\text{cm}^2$ )	22	23
Divergence angle $\varphi$ /( $^\circ$ )	$\leq 15$	

#### 4.3 分析与讨论

从模拟结果来看,该系统的耦合效率达 98% 以上,接近管壁的反射率,有效区域内的效率也能达 90%。自由传输 10 mm 以上时平顶分布区域可达 20 mm,而实际应用时因隔板玻璃和水层高折射率对散射光线的抑制作用,该系统获得的平顶区会更宽,传输距离也更远,有效抽运效率也得以提高;从出射角的统计结果来看,快慢轴的绝大部分光线射出角度均在  $15^\circ$  以内,跟据分析,慢轴缩束比 2.5:1 时,出射角小于  $15^\circ$ ,二者相符,此时光线传输 5 mm 的偏移量仅 1.3 mm,这一结果也与平顶区域大小变化值接近。并且平顶区内的抽运强度大于  $22 \text{ kW}/\text{cm}^2$ ,分布较为平坦,不均匀性调制度为 5% 左右,完全满足多程放大的抽运分布要求。可以认定,这个球形排布的抽运源及耦合汇聚系统能获得  $20 \text{ kW}/\text{cm}^2$  的抽运强度,有效抽运区内的耦合效率 90% 左右,传输距离 15 mm,可获得面积较大分布均匀的抽运场,能够满足峰值功率 100 kW 激光二极管面阵的抽运传输汇聚要求。

## 5 结 论

根据光线追迹原理,针对大口径高功率激光二极管面阵的端面抽运要求,讨论了缩束比与反射次数  $n$  和出射角  $\varphi$  对耦合效率、抽运均匀性及传输性的影响,总结了大口径高功率激光二极管面阵耦合系统的一般设计准则。依此设计了峰值功率 100 kW 的阵列及耦合系统,将常见的平面阵列改为球形排布,将耦合系统简化到仅用一个空心导管就能获得传输性能优良的大区域高强度均匀分布的抽运场。这种结合阵列排布的系统设计具有结构简单、耦合效率高、传输性能好、抽运分布均匀、可等比例放大、易实现模块化等特点,在高功率大口径激光装置中具有很大的应用潜力。

## 参 考 文 献

- Jiang Jianfeng, Tu Bo, Zhou Tangjian *et al.*. Pumped coupling system design of high average power disk laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(S0): 108~110  
蒋建锋,涂波,周唐建等. 高平均功率薄片激光多通抽运耦合系统设计[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(S0): 108~110
- Hao Yingchao, Ning Jiping, Yang Jisheng. Coupling systems in LD end-pumped solid-state lasers[J]. *Laser J.*, 2002, **23**(1): 25~27  
郝迎超,宁继平,杨吉生. LD 纵向抽运固体激光器中的耦合系统[J]. *激光杂志*, 2002, **23**(1): 25~27
- Fu Rulian, Wang Guangjun, Zhang Lingqian *et al.*. Simplify design of lens duct as coupling system for all-solid-state lasers[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 1998, **9**(2): 96~99  
傅汝廉,王广军,张凌倩等. 全固化激光器中的耦合系统—透镜导管的简化设计[J]. *光电子·激光*, 1998, **9**(2): 96~99
- A. Bayramian, R. Beach, C. Bibeau *et al.*. FY96-98 Summary report Mercury: next generation laser for high energy density physics SF-014[R]. Lawrence Livermore National Laboratory, 2000
- Toshiyuki Kawashima. Recent Progress of the HALNA DPSSL driver development [C]. *3rd International Workshop on High Energy Class Diode Pumped Solid State Lasers*, LLNLL, California USA, 2006
- Jia Wei, Hu Yongming, Li Mingzhong *et al.*. Simulation and design of hollow lens duct as a new kind of coupling system for high power laser diode arrays[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8): 939~942  
贾伟,胡永明,李明中等. 空心透镜导管的模拟与设计[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8): 939~942
- Gao Hongyun, Fu Rulian, Chen Desheng *et al.*. Design of hollow duct as coupling system in solid-state laser end-pumped by LDA [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2005, **16**(5): 541~544  
郜洪云,傅汝廉,陈德胜等. LDA 端抽运固体激光器的耦合系统—空心导管的设计[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(5): 541~544
- S. A. Payne, C. Bibeau, R. J. Beach *et al.*. Diode-pumped solid-state lasers for inertial fusion energy [J]. *J. Fusion Energy*, 1998, **17**(3): 213~217
- Jean Maignan, Brigitte Marchesin. LUCIA current status [C]. *3rd International Workshop on High Energy Class Diode Pumped Solid State Lasers*, LLNLL, California USA, 2006
- Yu Haiwu, Xu Meijian, Duan Wentao *et al.*. Investigation on pumping dynamics and pulsed energy storage performance of Yb ions[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(7): 4158~4168  
於海武,徐美健,段文涛等. Yb 离子抽运动力学及脉冲储能特性研究[J]. *物理学报*, 2007, **56**(7): 4158~4168
- J. A. Skidmore, B. L. Freitas, J. Crawford *et al.*. Silicon monolithic microchannel-cooled laser diode array [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(1): 10~12