

文章编号: 1001-3806(2012)01-0093-06

LD 阵列封装误差对空心导管均匀性的影响

贾文武 汪岳峰* 雷呈强 黄 峰

(军械工程学院 光学与电子工程系, 石家庄 050003)

摘要: 为了提高空心导管激光二极管(LD)抽运耦合系统的性能,采用理论分析和 ZEMAX 仿真模拟的方法研究了 LD 阵列封装误差对空心导管抽运耦合系统均匀性的影响。研究发现,当 LD 阵列中子光束经过空心导管后分割和叠加次数越多时,光束指向误差对空心导管的均匀性影响越小。在此基础上提出了空心导管 LD 抽运耦合系统的设计中对 LD 阵列光束准直的原则。结果表明,根据实际情况决定 LD 阵列中快慢轴方向准直后发散角的大小,以保证快慢轴方向的光束经过空心导管后能够有适当的反射和叠加次数,从而实现较高的耦合效率和抗 LD 阵列封装误差影响的能力。该研究可用于指导该类空心导管 LD 抽运耦合系统的设计。

关键词: 激光技术; 半导体激光器; 空心导管; 抽运; 封装误差

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.01.024

Effect of assembling error in LD array on homogeneity of hollow ducts

JIA Wen-wu, WANG Yue-feng, LEI Cheng-qiang, HUANG Feng

(Department of Optics and Electron, Ordnance Engineer College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In order to improve the performance of a hollow duct pumping system, how assembling error of a laser diode (LD) array affects the homogeneity of hollow ducts was studied by means of theoretical analysis and ZEMAX simulation. The result shows that the more each beamlet in a LD array is segmented, the less homogeneity is affected by beam direction error in LD array. Based on the above, collimating principle of LD beam in a hollow duct pumping system was proposed. That is, the collimated divergence of a LD array in fast and slow direction should be in a certain value to make sure that each beamlet can reflect several times in both directions. This can help to get a high coupling efficiency and make it insensitive to assembling error in LD array. This research is valuable for designing such kind of LD pumping systems.

Key words: laser technique; laser diode; hollow duct; pumping; assembling error

引 言

为了提高空心导管的输出功率,常常将多个 LD bar 条在快轴方向进行叠加,形成 LD 面阵;而为了提高 LD 阵列输出的光亮度,常常需要利用快慢轴准直光学器件对 LD 阵列快慢轴光束进行准直。在 LD 面阵的叠加过程以及准直光学器件的安装过程中,存在的误差(统称为 LD 阵列的封装误差)将会影响 LD 阵列的光束质量,并进而影响到 LD 抽运耦合系统的均匀性指标^[1]。在高功率固体激光器中,空心导管是常见的一种 LD 抽运耦合系统^[2-5]。当前学界对空心导管 LD 抽运耦合系统进行了大量的研究和报道,近年来不时有关于 LD 阵列的封装误差影响空心导管整形性能的报道出现^[6-8]。本文中,作者对 LD 阵列封装误

差对空心导管 LD 抽运耦合系统均匀性的影响进行了研究,并提出了相应的解决办法。这对解决当前国内生产的 LD 面阵普遍封装精度不高,严重影响了国产 LD 阵列在固体激光抽运中的应用的现实情况具有非常重要的意义。

1 LD 阵列封装误差对 LD 阵列光束的影响

LD 阵列的封装误差包括快慢轴方向准直透镜的安装误差和 LD 面阵的叠加误差。首先讨论准直透镜的安装误差对 LD 阵列光束的影响。通常 LD 光束发散角比较大,在快轴方向约 40°、慢轴方向约 10°,在实际应用中需要对 LD 阵列光束进行准直。虽然 LD 光束在快轴方向发散角较大,但是在该方向的光束质量较好且发光点之间的间距较大准直较为容易;而慢轴方向光束质量较差且间距较小准直较为困难。目前高功率的 LD 阵列一般都加装了快轴准直镜。准直后快轴方向发散角为 0.5°的 LD 阵列已能在市场上买到,远远小于慢轴方向准直后能够达到的发散角大小(通常 3°~4°)。下面以快轴方向为例讨论准直透镜对

作者简介: 贾文武(1984-),男,博士研究生,主要研究方向为固体激光技术及光束整形技术。

* 通讯联系人。E-mail: wyfmail@sina.com

收稿日期: 2011-04-18; 收到修改稿日期: 2011-05-04

LD 阵列光束的影响。

1.1 快轴准直镜安装误差对 LD 阵列光束的影响

由于快轴准直镜的焦距通常很短(约 $500\mu\text{m} \sim 1000\mu\text{m}$) ,因此其对安装误差非常敏感。如图 1 所示,快轴准直镜在安装中存在 6 个自由度^[9]。

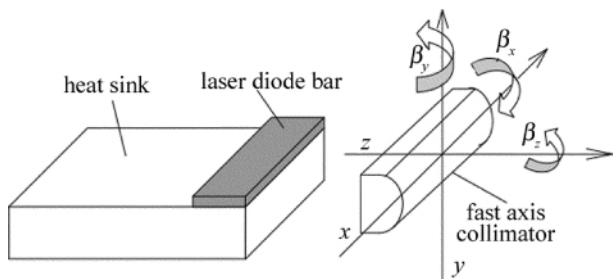


Fig. 1 Degree of freedom for assembling a fast axis collimator

其中,快轴准直镜沿 z 方向移动和沿 y 轴的旋转,将会导致发光点相对快轴准直镜的焦面移动,造成准直性能下降、快轴方向的发散角增大。将 LD 阵列在快轴方向视为一个发光点,则当该发光点刚好位于快轴准直镜的焦点时具有最小的发散角。当快轴准直镜沿 z 方向发生相对位移时,发光点将不再在快轴准直镜的焦点上,经过快轴准直镜后准直性能将会下降,快轴方向的发散角将会增大。而快轴准直镜绕 y 轴旋转则使 LD bar 条中不同位置处的发光点相对快轴准直镜具有不同的距离。因此,不同的发光点准直后具有不同的发散角。要求快轴准直镜在 z 方向的安装误差要小于 $5\mu\text{m}$,绕 y 轴的旋转角度 β_y 的误差要小于 1mrad 。

而快轴准直镜沿 y 轴移动或者绕 z 轴旋转,将会使光束的传播方向相对光轴发生偏转。如图 2 所示,设焦距为 f 的快轴准直镜在 y 轴方向由于安装误差向上移动了 Δy 的距离。则 LD 阵列光束的主光线经过快轴准直镜后出射角度相对于光轴的角度 δ 为:

$$\delta = \arctan(\Delta y/f) \quad (1)$$

在小角度近似下可以写为: $\delta = \Delta y/f \quad (2)$

式中 f 为快轴准直镜的焦距。

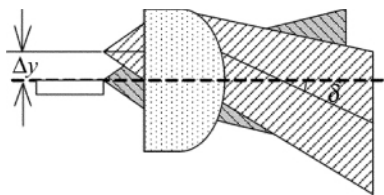


Fig. 2 Displacement of the fast axis collimator in y -direction and beam direction deflection

可见,快轴准直镜的安装误差将会使 LD 的光束指向发生偏转。当快轴准直镜的焦距为 $560\mu\text{m}$ 、快轴准直镜在 y 方向偏离理想位置 $5\mu\text{m}$ 时,LD 光束在快轴方向绕光轴偏转约 9mrad 。可见,在 LD 阵列中对准直镜的安装精度的要求是比较高的,如果安装工艺达不到要求,则会较大地影响准直后 LD 阵列光束的发

散角大小和子光束的传播方向。

当快轴准直镜绕 z 轴旋转时,则 LD bar 条中不同的发光点相对于快轴准直镜具有不同的 Δy ,因此具有不同的偏转角度。LD bar 条的两端具有最大的 y 轴方向的位移,要使由快轴准直镜绕 z 轴旋转引起的最大位移 $\Delta y < 5\mu\text{m}$,则快轴准直镜的旋转角度 β_z 的误差小于 1mrad 。

因此,快轴准直的安装误差将会造成两方面的影响: (1) LD 阵列光束的发散角增加,影响准直效果; (2) 使 LD 阵列中不同的子光束绕光轴偏转不同的角度,即子光束的光束传播方向不平行,称之为 LD 阵列的光束指向误差。在慢轴方向存在相似的结论。

1.2 LD 面阵的叠加误差及其对 LD 阵列光束的影响

为了增加 LD 的输出功率,通常将多个 LD bar 条在垂直方向叠加构成 LD 面阵的形式。在 LD bar 条的叠加过程中出现的误差必然会对 LD 面阵的光束特性产生影响。

如图 3a 所示,在叠加过程中,由于散热片的加工误差使上下表面不平行、LD 芯片焊接的不平以及相邻 LD 之间的绝缘处理等,将会导致叠加后 LD 面阵中各个 LD bar 条在垂直方向出现偏转。而如图 3b 所示,LD 面阵中各 bar 条在水平方向出现旋转,也会导致子光束在慢轴方向上的传播出现偏转。因此,LD 面阵的叠加误差将会导致各 LD bar 条的子光束的传播方向不平行,即存在光束指向误差。由 LD 面阵叠加引起的光束指向误差的典型值在 $4\text{mrad} \sim 5\text{mrad}$ 范围内。然而不同的封装工艺造成的光束指向误差不同,随

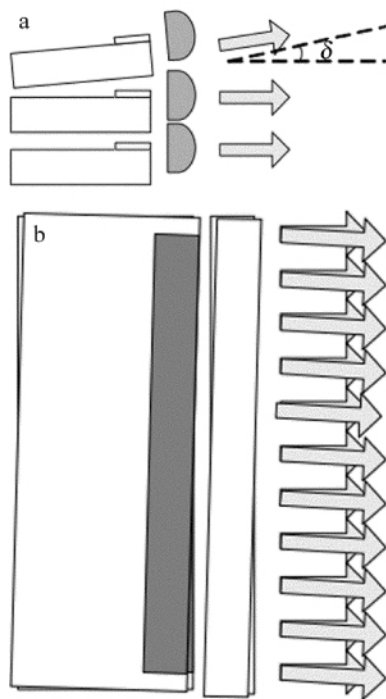


Fig. 3 Stacking faults in a LD array
a—in fast axis b—in slow axis

着 LD 面阵中 bar 条数目的增加,封装误差的累加也会进一步增大 LD 阵列中的光束指向误差。在国产 LD 阵列中该现象尤为明显,在经过一小段距离的传播后往往就能够发现快轴方向的光束间隔发生变化,间距不再相等。

综上所述,LD 阵列的封装误差一方面将会导致 LD 阵列的准直性能下降,子光束的发散角大于理想准直情况下的发散角;另一方面将会导致 LD 阵列中子光束的光束指向之间相互不平行。其中 LD 阵列中子光束的准直性能下降可以通过准直后子光束的发散角大小体现,通常不会直接影响 LD 抽运耦合系统的均匀性,但是,子光束的光束指向误差往往会对 LD 抽运耦合系统的均匀性产生影响。

2 LD 阵列光束指向误差对空心导管 LD 抽运耦合系统均匀性的影响分析

对于如图 4 所示的空心透镜导管 LD 抽运耦合系统(出射端面尺寸为 $2H_1$,入射端面尺寸为 $2H_2$,空心导管长度为 L),LD 阵列光束通过透镜后各子光束的主光线经过透镜聚焦于透镜的后焦点上,而子光束的主光线与空心导管的出射端面相交。当 LD 阵列不存在光束指向误差时,子光束主光线与空心导管出射端面的交点之间等间距排列。此时,如果不考虑空心导管的影响,子光束在空心导管的出射端面将会是一个以主光线交点为中心的扩展光斑。如图 5a 所示,所有子光束的扩展光斑在出射端面等间距排列并相互叠加,从而得到均匀的光斑分布。但是如果 LD 阵列中存在光束指向误差,子光束的主光线的光束指向不平行,则经过透镜后,子光束的主光线与空心导管的出射端面的交点不再具备等间距排列的特点。如图 5b 所示,若子光束的功率相同,则间距缩小的地方叠加后光功率密度将会增大,而间距增大的地方光功率密度将下降,从而出现强度调制的现象,使抽运目标面上的

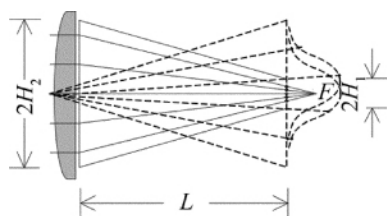


Fig. 4 Beam splitting sketch for a hollow duct

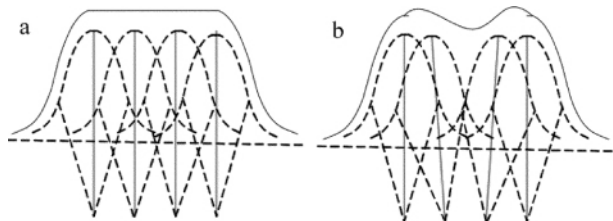


Fig. 5 Inhomogeneity caused by beam direction error

均匀性遭到破坏。

而空心导管存在时,空心导管对单个子光束会产生分割和叠加作用。单个的 LD 子光束由于发散角的存在,在空心导管内部传播的过程中光斑尺寸逐渐增大。当较大角度的光线与空心导管的壁相交后,将会被空心导管的侧壁反射。LD 阵列中位于空心导管入射端中心的发光点发出的高斯光束通过空心导管后, θ 角满足 $-H_1/(2L) < \tan\theta < H_1/(2L)$ 范围的光直接从空心导管的端面出射。而 θ 角满足 $H_1/(2L) < \tan\theta < 3H_1/(2L)$ 和 $-H_1/(2L) > \tan\theta > -3H_1/(2L)$ 的光束经过一次反射后从空心导管的端面出射,且在出射端面处,其光强分布函数翻转后与直接出射的 LD 光束光强分布函数叠加。而 θ 角满足 $3H_1/(2L) < \tan\theta < 5H_1/(2L)$ 和 $-3H_1/(2L) > \tan\theta > -5H_1/(2L)$ 的光束经过两次反射后从空心导管的端面出射,在出射端面处其光强分布函数(两次翻转)与直接出射的 LD 光束的光强分布函数叠加。因此对于子光束而言,根据反射次数的不同,空心导管将单个子光束分割为不同的角度范围并在出射端面重合。LD 阵列中其它位置发光点发出的子光束经过透镜偏转后光束传播方向发生偏转,但是其与空心导管侧壁相交后仍然会被反射并在出射端面叠加。

假设 LD 阵列中的子光束为高斯分布,且通过空心导管后只经过一次反射和叠加,则中心子光束的分割叠加后的图形如图 6 所示,而不同位置 LD 发光点的光束在空心导管出射端口的光强度分布函数如图 7

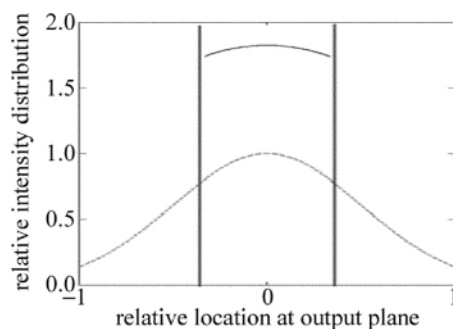


Fig. 6 Result of beam superposition after one reflection

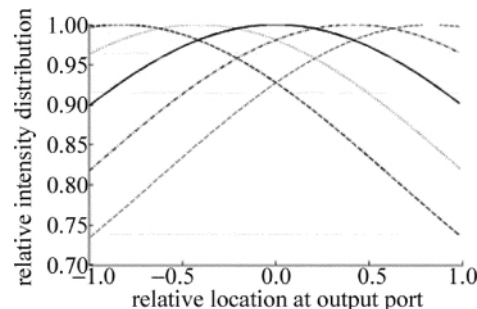


Fig. 7 Intensity distribution of each beamlet at the output port of the hollow duct

所示(未考虑子光束的干涉叠加)。其中纵坐标为每个 LD bar 条的光强度分布函数为归一化函数,横坐标为空心导管出射端面的归一化距离。从图中可以看出,中心发光点的子光束经过空心导管在角度方向的分割并在出射端面叠加后,均匀性较之前获得了较大的提高。而其它位置点的子光束经过分割叠加后在出射端面子光斑的分布不具有对称性,但是和其对称位置的发光点的光斑具有对称性,叠加后仍将具有较高的均匀性。

当子光束的分割次数不多时,单个 LD 光束经过空心导管整形后仍然存在较大的不均匀性。此时,在空心导管的出射端口仍然需要类似所示的子光束的叠加过程才能获得更高的均匀性。显然,此时 LD 阵列中子光束的光束指向误差同样会影响空心导管光分布的均匀性。如果单个 LD 发光点的光束在空心导管内多次反射,即其子光束按角度划分为多个部分,单个子光束分割叠加在出射端面的光分布也会比较均匀(不考虑单个发光点光束干涉的情况)。此时空心导管 LD 抽运耦合系统的均匀性受 LD 阵列光束指向误差的影响将会大大减小。因此,LD 阵列光束指向误差与单个子光束在空心导管内的分割叠加次数有关,分割叠加的次数越多时,LD 阵列封装误差引起的光束指向误差对其均匀性影响将越小。但是子光束的多次反射增大了系统的反射损耗,降低了系统的耦合效率,同时反射次数的增加也会增加出射光束的发散角,使空心导管整形光束离开出射端面后均匀性迅速下降。

3 LD 阵列光束指向误差对空心导管 LD 抽运耦合系统均匀性的影响模拟

以一款由 7 个 LD bar 条组成的 LD 阵列作为被整形和匀化的光源,设计空心透镜导管 LD 抽运耦合系统,并在次过程中验证 LD 阵列的光束指向误差对空心导管 LD 抽运耦合系统的影响。

3.1 LD 阵列的参量及光束指向误差模型

需要整形和匀化的 LD 面阵的主要技术参量如表 1 所示。其中快轴方向的发散角预准直至 1° ,这在当前很容易就能够实现。在表中,光束发散角为光强度

Table 1 Parameters of LD stack

wavelength	808nm
divergence(full width at half maximum) fast: pre-collimated to 1° , slow: 10°	
number of LD bar	7
pitch of LD bar	1.8mm
length of LD bar	10mm
number of LD in each bar	19
pitch in LD bar	500 μ m
power per bar	100W

下降到峰值光强度的一半处的全发散角,转化为光强度下降到峰值光强度的 e^{-2} 处的半发散角分别为快轴方向 0.85° ,慢轴方向 8.5° 。在后面光斑尺寸的计算中则以该发散角为准,保证在该光斑尺寸范围内包含了大部分的 LD 光束能量。可以计算出 LD 面阵的发光面积为 $10\text{mm} \times 10.8\text{mm}$,为此设定空心导管的入射端尺寸为 $13\text{mm} \times 13\text{mm}$ 。要求通过空心导管整形后抽运光斑的尺寸为 $2.5\text{mm} \times 5\text{mm}$,因此空心导管出射端的尺寸也为 $2.5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 。慢轴方向经过空心导管后光斑尺寸为 5mm ,快轴方向经过空心导管后光斑尺寸为 2.5mm 。在 ZEMAX 中建立关于空心导管的 LD 抽运耦合系统模型,在模型中 LD 面阵由 7 个独立的 LD bar 条组成。这样就可以分别设置各个 bar 条绕不同的轴旋转角度,对 LD 阵列的光束指向误差进行模拟。

3.2 光束指向误差对空心导管 LD 抽运耦合系统的影响

首先根据空心导管的设计原则,子光束在空心导管内反射一到两次,以减少反射损耗提高耦合效率。慢轴方向具有最大的发散角,因此,首先以慢轴方向为准计算空心导管的长度。当空心导管的长度为 50mm 时,计算得到慢轴方向的子光束光斑尺寸约为 15mm ,此时慢轴方向的子光束主要经过零次、一次或两次反射从空心导管出射。此时快轴方向的光斑尺寸为 1.5mm ,小于空心导管出射端尺寸 2.5mm ,中心发光点的子光束在快轴方向直接通过空心导管出射,边缘位置发光点的子光束经过零次或一次反射后从空心导管出射。而空心透镜导管中透镜的焦距按照参考文献 [10] 中的经验公式 $L = cF$ (其中 L 为空心导管长度, c 为经验常数,满足 $c \in (0.76, 0.77)$, F 为透镜焦距) 取为 65mm 。所得到的空心透镜导管 LD 抽运耦合系统如图 8 所示。

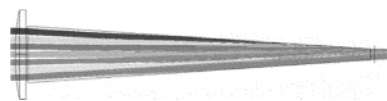


Fig. 8 Hollow lens duct coupling system

在 ZEMAX 中建立关于空心导管的非序列光学模型,并在距离出射端面 1mm 处放置探测器。探测器划分为 60×40 的网格,总共追踪约 24000000 条光线。定义空心导管侧壁的反射率为 0.95,而不考虑透镜对 LD 阵列光束能量的损耗。在无光束指向误差的情况下所得到的目标面的光斑分布情况如图 9a 所示。计算得到平顶区域的非均匀为 5.10%,耦合效率为 95.55%。可见 LD 阵列中没有光束指向误差时,空心透镜导管 LD 抽运耦合系统在出射端面上能够获得很高的抽运均匀性和较高的耦合效率。

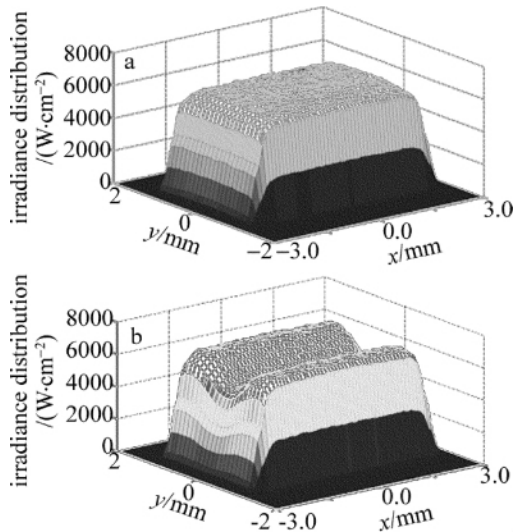


Fig. 9 Irradiance distribution of a LD pumping system by means of hollow duct

a—without beam direction error b—with beam direction error

为了模拟 LD 阵列中存在光束指向误差的情况, 设置 LD 阵列中间的第 3 个 bar 条的子光束在快轴方向向上偏转 3.5mrad , 第 5 个 bar 条向下偏转 3.5mrad 。此时第 3 个 bar 条子光束主光线在空心导管的出射端面将会靠向第 2 个 bar 条子光束主光线, 第 5 个 bar 条子光束主光线在空心导管的出射端面靠近第 6 个 bar 条的主光线。因此, 在空心导管的出射端面沿快轴方向的两侧将会出现光照度分布的峰值。模拟所得到的目标面上抽运光斑分布如图 9b 所示。模拟结果显然也证实了上述分析结论。计算得到此时空心导管出射端面上的抽运光分布不均匀性约为 12.77% 。子光束的光束指向误差也会对空心导管 LD 抽运耦合系统的抽运均匀性产生较为严重的影响。如果 LD 阵列中的多个子光束的光束传播方向相互不同, 则可能出现参考文献 [8] 中的条状调制现象。

此外, 保持空心导管的两出射端面尺寸不变的情况下, 增大空心导管的长度至 140mm , 相应的透镜焦距增大为 180mm , 中心 bar 条的子光束在快轴方向的光斑尺寸约为 4.2mm , 超过出射端尺寸 2.5mm , 表面子光束在快轴方向进行了分割和叠加。此时设置第 3 个 bar 条向上偏转 3.5mrad , 模拟得到抽运目标面上的光斑分布如图 10 所示。可以计算出此时快轴方向上的不均匀性为 5.3% , 系统耦合效率为 91.1% 。可见随着空心导管的长度增加, 快轴方向的子光束经过空心导管的分割和叠加后提高了 LD 抽运耦合系统的均匀性, 降低了 LD 阵列中光束指向误差对均匀性的影响。但是此时分割次数太少, 均匀性仍然受到一定程度的影响。而在慢轴方向光束的反射次数进一步增加, 反射损耗降低了系统的耦合效率。

在保持空心导管的两出射端面尺寸不变的情况

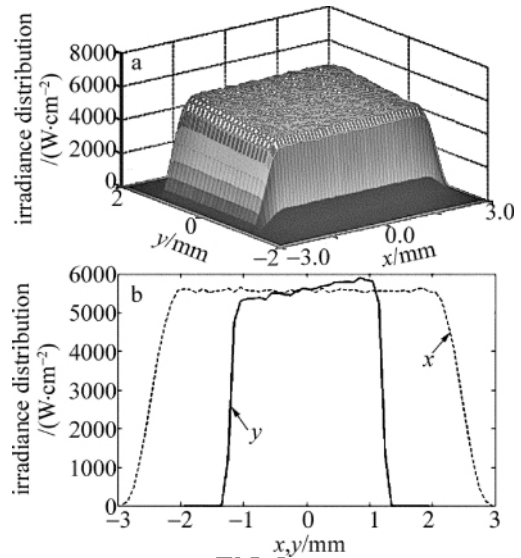


Fig. 10 Irradiance distribution of a LD pumping system by means of hollow duct (140mm)

下, 继续增大空心导管的长度至 240mm , 相应的透镜焦距增大为 310mm 。此时快轴方向的光斑尺寸为 7.12mm , 子光束在快轴方向主要经过零次、一次或两次反射, 同样设置第 3 个 bar 条向上偏转 3.5mrad 。模拟得到抽运目标面上的光斑分布如图 11 所示。可以计算得到此时快轴方向的非均匀性为 1.94% , 耦合效率为 83.7% 。显然通过增加 LD 光束在快轴方向的分割叠加次数, 改善了光束指向误差对均匀性的影响。

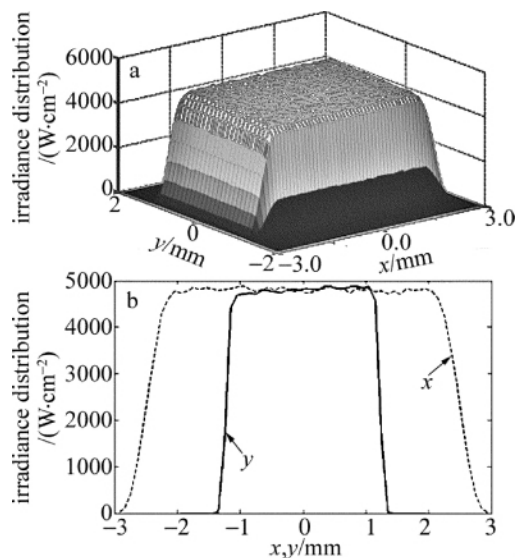


Fig. 11 Irradiance distribution of a LD pumping system by means of hollow duct (240mm)

因此, 如果子光束的发散角很大或者空心导管的长度较长, 单个子光束的光束在空心导管内经过多次反射后在出射端面叠加, 则可能使单个子光束在空心导管出射端面叠加后就获得均匀的光照度分布。这样这种 LD 阵列中子光束的光束指向误差对光照度分布不均匀性的影响就不再存在。但是在此例中, 慢轴方向光束由于发散角太大, 将会在空心导管内部至少

反射15次。显然更多的反射次数并不能显著改善空心导管的均匀性,反而因为反射次数太多增大了反射损耗,降低了系统的耦合效率。与空心导管长度为50mm时相比,耦合效率大大下降。

如果在LD阵列快轴方向的准直过程中,不追求达到最大的准直效果,适当增大快轴方向的发散角,使空心导管的长度为50mm时快轴方向在空心导管内部也反射一到两次。那么此时既能保证空心导管LD抽运耦合系统的耦合效率,又能够在LD阵列存在封装误差时仍然能够得到较好的均匀性,同时也降低了对快轴准直镜的制作和安装的要求(安装精度也会影响准直效果)。假设快轴方向准直后发散角为 4.5° ,在空心导管的长度为50mm时,快轴方向的光斑尺寸为 6.3° ,在空心导管内部仅经过零次、一次或两次反射。此时仍设定LD阵列中第3个bar条在快轴方向向上偏转 3.5mrad ,模拟得到目标面上的光斑分布如图12所示。

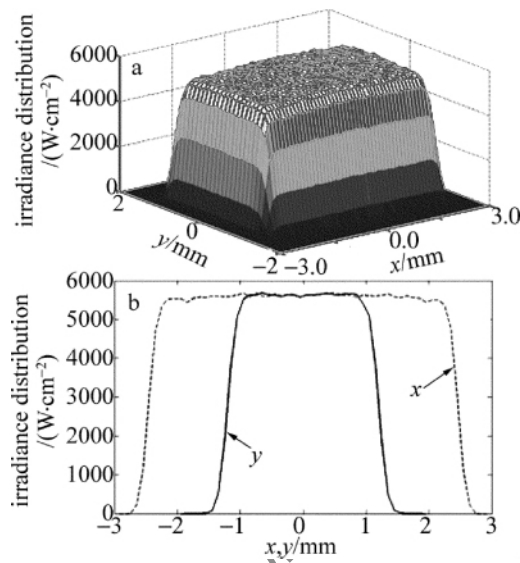


Fig. 12 Irradiance distribution of a LD pumping system by means of hollow duct (4.5° divergence in fast axis)

可以计算出此时抽运光斑平顶区不均匀性为2.3%,耦合效率为93.7%。可见此时LD阵列封装误差引起的光束指向误差并没有影响系统的均匀性,同时实现了较高的耦合效率。因此在空心导管LD抽运耦合系统中,尽管当前准直技术能够保证LD阵列在快轴方向获得较好的准直度,但是在LD抽运耦合系统的设计中,并不是快轴方向的发散角越小越好,而是需要根据实际情况确定准直后发散角的大小,使慢轴方向的光束通过空心导管反射一到两次的时候,快轴方向的光束也同时反射一到两次。这样既能够实现较高的耦合效率,又具备一定的抗LD阵列封装误差的能力。

4 结论

LD阵列封装误差对LD阵列光束而言,主要引起子光束的准直度下降和子光束的光束指向不平行(光束指向误差)。其中光束指向误差对空心导管LD抽运耦合系统均匀性将产生影响。当子光束经过空心导管后分割和叠加次数较少时(小于一次到两次),光束指向误差将严重影响空心导管的均匀性;而子光束经过空心导管的分割和叠加次数较多时(大于一次到两次),光束指向误差对空心导管的均匀性影响很小。通过上述分析,认为在实际LD抽运耦合系统的设计中,应根据实际情况确定LD阵列中快慢轴方向准直后发散角的大小,以保证快慢轴方向的光束经过空心导管后能够有适当的反射和叠加次数,从而实现较高的耦合效率和抗LD阵列封装误差影响的能力。在慢轴方向难以获得较好的准直度时,可适当降低快轴方向的准直度。这样一方面不需要很高的快轴准直镜的封装精度以保证较小的快轴发散角,同时得到的LD抽运耦合系统具有抗光束指向误差影响的能力。这对当前国产LD阵列封装精度普遍不高的现实具有重要意义。

参考文献

- [1] WANG Y, CHEN P F, ZHAN P. Error analysis of light beam with a cylindrical lens as the beam collimator in end pumping scheme [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(5): 507-510 (in Chinese).
- [2] GAO H Y, FU R L, CHEN D Sh, *et al.* Design of hollow duct as coupling system in solid-state laser end-pumped by LDA [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2005, 16(5): 541-544 (in Chinese).
- [3] BEACH R J, HONEA E C, BIBEAU C, *et al.* Hollow lens duct: US, 6160934 [P]. 2000-12-12.
- [4] AMINPOUR H, ASL I M, SABBAGHZADEH J, *et al.* Simulation and design of applied hollow-duct used for side-pumped cutting-edged of high power disk laser [J]. *Optics Communications*, 2010, 283(23): 4727-4732.
- [5] BAYRAMIAN A, BEACH R, BIBEAU C, *et al.* FY96-98 summary report Mercury: next generation laser for high energy density physics [R]. Livermore, USA: Lawrence Livermore National Laboratory, 2000: 19-27.
- [6] DENG Q H, PENG H Sh, SUI Zh, *et al.* Coupling method for laser-diode-array end-pumped solid-state amplifiers [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(31): 5908-5915.
- [7] DENG Q H, PENG H Sh, SUI Zh, *et al.* Simulation on a new coupling method of laser diode array end-pumped large-aperture amplifiers [J]. *Acta Physica Sinica* 2008, 57(10): 6340-6347 (in Chinese).
- [8] DUAN W T, JIANG D B, JIANG X J, *et al.* High power laser diode arrays end-pumped efficient coupling system [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2009, 36(1): 51-55 (in Chinese).
- [9] BACHMANN F, LOOSEN P, POPRAW R. High power diode lasers technology and applications [M]. New York: Springer 2007: 75-117.
- [10] JIA W, HU Y M, LI M Zh, *et al.* Simulation and design of hollow lens duct as a new kind of coupling system for high power laser diode arrays [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(8): 939-942 (in Chinese).