

文章编号: 1001-3806(2003)04-0357-05

激光二极管光束整形技术

郭明秀¹ 沈冠群² 陆雨田¹

(¹中国科学院上海光学精密机械研究所,上海,201800) (²上海市激光技术所,上海,200233)

摘要: 阐述了对 LD 输出光束进行整形的必要性。在国内首次对目前常用的一些典型的光束整形技术的整形原理、关键技术及整形效果进行了分析、比较和评价。

关键词: 激光二极管;激光二极管阵列;光束整形;拉格朗日不变量

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A

The technology of laser diode beam shaping

Guo Mingxiu¹, Shen Guanqun², Lu Yutian¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Science, Shanghai, 201800)

(² Shanghai Institute of Laser Technology, Shanghai, 200233)

Abstract: This paper introduces the necessity of beam shaping for LDA beam. Some typical beam shaping methods' shaping principles, key techniques and shaping effects are analyzed, compared and assessed for the first time.

Key words: laser diode(LD); laser diode array(LDA); beam shaping; Lagrange invariant

引 言

激光二极管 LD (laser diode) 及其阵列 LDA (laser diode array) 的主要特点是高效、稳定、结构简单,可制成小体积全固化器件。广泛应用于 LD 泵浦的固体激光器、光纤激光器、材料处理、医药、航空航天等各个领域。

LD 由于其特殊的工作原理,其光束质量在垂直与平行于 p-n 结两个方向上相差很大。通常把垂直于 p-n 结方向称为快方向,平行于 p-n 结方向称为慢方向。快方向上的光束接近衍射极限 ($M^2 = 1$), 发散角大;而慢方向上的光束质量则极差 ($M^2 > 1000$), 发散角小。正是由于这两个方向上的光束质量的极不平衡性使得 LD 应用起来比较困难。而且这样的快慢两个方向上光束质量相差很大的光束无法用一般的光学系统直接改善而达到高功率密度输出。因此,LD 要获得更广泛的应用,必须采用光束整形方法,解决光束质量差、功率密度低的问题。

1 光束整形技术的原理、关键技术

作者简介: 郭明秀,女,1975 年 11 月出生。硕士。现从事半导体泵浦固体激光器及半导体激光器光束整形的研究工作。

收稿日期:2002-12-19;收到修改稿日期:2003-01-22

1.1 LDA 光束整形技术的原理

假设 d 为光源的尺寸, θ 为其发散角, n 为所在介质的折射率,一个光源无论经过什么样的光学成像系统的变换,乘积 $L = d \times n \theta$ 始终保持不变,称之为拉格朗日不变量。光束质量的评价一般采用 M^2 来表征,但通常也可采用拉格朗日不变量来表征。由于通常的光学成像系统不能改变光束的拉格朗日不变量,因此,必须将 LD 光束分割、旋转、重排,即光束整形,把慢方向上的拉格朗日不变量减小,同时使快方向上的拉格朗日不变量增加,达到均衡拉格朗日不变量,提高光束质量的目的。

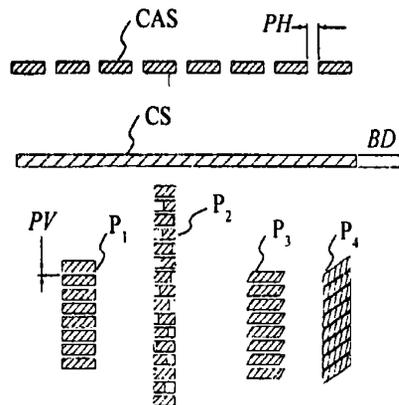


图 1 LDA 光束重组的几种结果

图 1 表示光束重排的几种结果 ($P_1 \sim P_4$)^[1]。CSA 是 LDA 发光区排列方式。采用按显微镜分割时,LDA 的发光区排列可看成成像 CS 一样,即在光束

分割中不用考虑节数、结间距 PH , 光束分割数不受 LDA 节数的限制, 因此, 可形成光束重排方式 P_2 且能像 P_1 一样地提高光束质量, 这种分割使得光束整形器易于制作且成本低。

1.2 关键技术

光束快方向的准直和慢方向上光束质量的提高是整个光束整形的关键所在。快方向上的发散角一般采用微柱透镜来调整, 但由于发散角极大, 用来准直的微柱透镜要求数值孔径比较大, 几何尺寸很小。制造一种性能好的微柱透镜在加工、设计、安装上都具有较高的难度。降低慢方向上的拉格朗日不变量主要是由光束整形器实现的。

2 主要的光束整形技术

2.1 光纤转换器(line-to-bundle converting fiber)^[2]

最简单的光束整形技术当属光纤转换器, 瑞士伯尔尼大学 (University of Berne) 应用物理所的 Zbinden 等人在 LDA 端面泵浦的 Nd:YLF 调 Q 激光器中采用了这一技术。其原理如图 2, 采用光纤阵列将光束按 LDA 横模进行分割, 将光纤在靠近 LD 的一端排成线阵列, 另一端则人为排成束状。

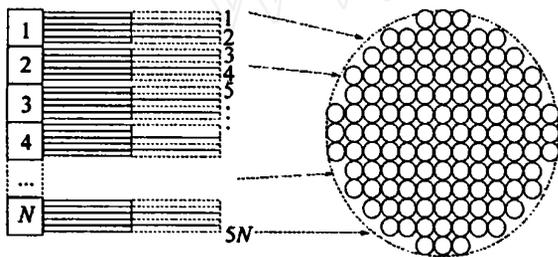


图2 光纤转换器的原理图

该种方案中提高耦合效率的方法主要有: (1) 在光纤转换器的输入端连续排列光纤; (2) 光纤转换器输入和输出端面镀 AR 膜; (3) 先用微柱透镜将 LDA 的快方向进行准直再耦合进光纤, 这样得到的光束空间发散均匀。另外可通过面阵列或将单个 LDA 的光纤转换器的输出端面再捆绑在一起达到高功率的目的, 但是这样并不能提高泵浦光的亮度。

2.2 渐变折射率透镜 (GRIN) 阵列整形^[3]

GRIN 透镜阵列整形技术是由日本钢铁公司的 Yamaguchi 等人发明的。采用 GRIN 透镜阵列将光束按照 LDA 节分割准直, 然后聚焦。如图 3, 该方法没有重排子光束, 但是它通过透镜阵列对每个 LDA 结分别准直而提高了 LDA 的填充因子, 结果是慢方向的拉格朗日不变量减少了, 即光束质量得到了提高, 但是快慢两个方向的光束质量相差还是

较大, 最后得到的光束分布不均匀, 整形效果不太明显。但由于这种方法较早提出了按照 LDA 节分割准直的思想而受到重视。

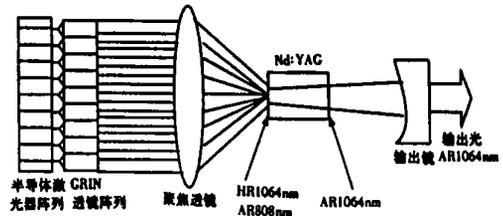


图3 渐变折射率透镜阵列整形技术

2.3 多棱镜阵列 (multiprism array)^[4]

多棱镜阵列也是日本钢铁公司的 Yamaguchi 等人发明的。其原理如图 4, 采用多棱镜阵列将光束按照 LDA 节分割, 旋转重排, 达到改善光束质量的目的。

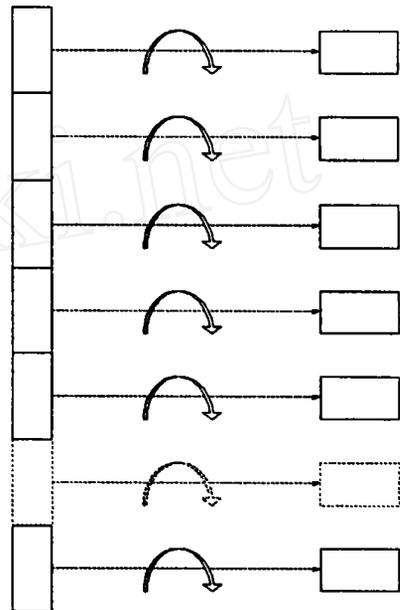


图4 旋转重排原理图

多棱镜阵列如图 5 所示, 使用时把 LDA 结与小棱镜一一对应。这些棱镜将每条子光束旋转 90°, 从第 1 个棱镜入射的光束在相邻的第 2 个棱镜出

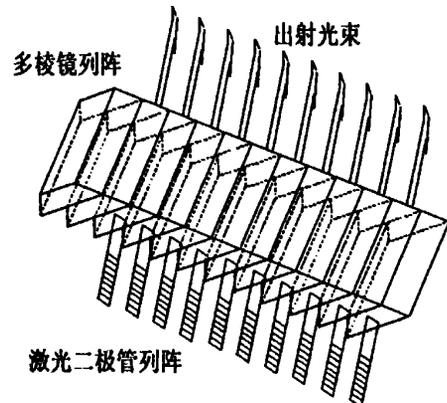


图5 多棱镜阵列排列图

射,故棱镜数目比 LDA 结多 2 个。单个斜棱镜的作用如图 6 所示。两个平行面 σ_1 和 σ_2 是全等的底角为 45° 的等腰梯形,两个平行面 σ_2 和 σ_3 以及面 σ_1 和 σ_3 都是锐内角为 $\tan^{-1}(1/\sqrt{2})$ 的平行四边形。面 σ_1 和 σ_2 与面 σ_2 和 σ_3 垂直, σ_1, σ_2 和 σ_3 3 个面互成 60°,面 σ_1 与 σ_2, σ_2 与 σ_3 分别成 45° 的夹角。光束与 σ_1 成 θ_1 入射,依次分别在 σ_1, σ_2 和 σ_3 上反射,被旋转 90° 后,从 σ_2 面垂直出射。

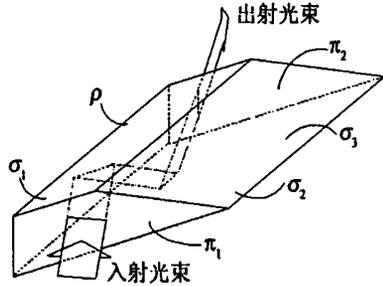


图 6 单个斜棱镜作用示意图

同 GRIN 阵列相比,多棱镜阵列中 4 个附加光学面和 3 个反射面的存在降低了耦合效率。但是由于均衡了快慢方向的拉格朗日不变量,其功率密度提高了大约 18 倍。

2.4 双反射镜整形技术(two mirror beam-shaping technique)^[5]

英国 Southampton 大学光电研究中心的 Clarkson 等人提出了采用两个高反平面镜来实现快慢两个方向上光束质量因子的均衡,而亮度只略微降低。它将光束按照镜间错位距离分割,分段重排,加工和调整都比较简便。

其工作原理如图 7 所示,整形装置结构很简单,把两面高反射率的镜子很近(相距 d)地平行放置,且在 x 和 y 方向上相互错开一些,这样每个镜子都有一小部分未被对方挡住而形成了光束整形的入射和出射孔。平面镜表面垂直于图所在平面。假设 1 束在 $x-z$ 面和 $y-z$ 面的激光以与 $x-z$ 面和 $y-z$ 面成 θ_x 和 θ_y 斜入射到反射镜 B 未被挡住的部分。把入射光束看作相邻的一系列子光束组成,其中,光束 1 从 A 的上部和 B 的旁边穿过,没有改变传播方向地出射。光束 2 从 A 上部穿过后碰到 B 上,入射到 B 上并被 B 反射到 A 上,光束 2 紧随光束 1 后入射到 A 上,沿光束 1 的方向出射且合并于光束 1 中,其它光束同样经数次反射后沿光束 1 的方向出射,比光束 1 略低一些。该整形器实际上就是将入射光束分割成子光束并改变子光束的方向和位置使它们互相重叠出射。可通过调节 d, θ_x, θ_y 而达到均衡 M_x^2

和 M_y^2 目的。

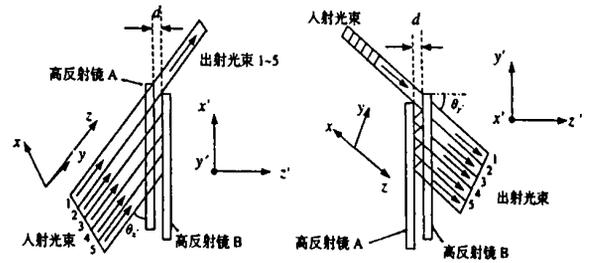


图 7 平面镜整形技术

这种方法能有效地除掉 LDA 两个相邻节之间的死区,可以提高亮度。亮度的提高依赖于发光区的宽度和死区宽度的比率。但是由于非发光区造成光束质量 M_x^2 变大和由于光纤透镜准直过程中的削波损耗造成 M_y^2 变大,以及光束在整形器中传播时相邻光束某些部分发生了重叠,从每个节出来的光束传播到焦点的光程有些差别等原因,对亮度的提高有一定影响。

2.5 阶梯反射镜整形(a pair of step-mirrors)^[6]

德国夫朗和费激光技术所的杜可明等人发明的阶梯镜是一种有效平衡两个方向光束质量的方法。采用阶梯反射镜将光束按照镜面尺寸分割,旋转重排。

该整形装置是由两组完全相同的阶梯反射镜构成,每组都由 N 个高反射率表面组成,如图 8 所示。第 1 组阶梯镜每个镜面都绕慢轴倾斜 45°,相邻的镜面在沿光束传播方向上相距一常数 d (等于单个镜面的宽度)。第 2 组阶梯镜与之类似,且两组阶梯镜的镜子都一一相对。当准直光束入射到第 1 组阶梯镜反射面上时,会被这些镜面沿慢轴分割为 N 份,每个子光束经过第 2 组微型阶梯反射镜,再被反射到快轴方向上。原本是一条线状的光束就在同一高度上沿慢轴方向被重新排列为平行的 N 条子光束。整形结果光场分布为一正方形光斑,在光传播方向上光场分布接近均匀分布。

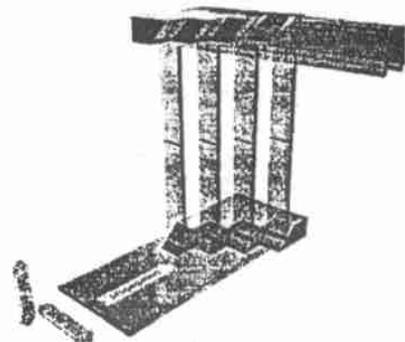


图 8 阶梯反射镜原理图

减少阶梯镜宽度,增加重组光束的填充因子可

提高聚焦光的亮度。这种方法能得到两个方向光束质量相差很小的高效的光束。系统结构紧凑坚固,阶梯镜对调整和“smile”不敏感,整个系统机械元件易于集成,不需要昂贵的元件,灵活性好。

2.6 微片棱镜堆线光束整形器^[7]

中科院上海光机所的陆雨田等人提出了微片棱镜堆整形技术,加工和调整非常简单,为国内唯一能够依据自主知识产权提供大功率 LDA 单光纤耦合输出模块的单位。该方法采用微片棱镜堆将光束按照微片的宽度分割,旋转重排,最后所得光斑类似于图 2 中的 P_3 和 P_4 。

微片棱镜堆由许多片很薄的等腰三角棱镜组成,如图 9 所示。每个薄片都绕自己的一条底棱旋转 45° ,然后将它们依次排列在一起。平行于底棱的入射光线在 σ_1 上折射后进入棱镜,接着在底面 σ_2 上产生全内反射后传向 σ_3 面,并经折射后从 σ_3 出射。分布在与 σ_2 面夹角为 θ 的平面内入射的光束,经过底面 σ_2 的反射将被旋转 2θ ,分布在与 σ_2 面夹角为 $-\theta$ 平面内。绕底棱旋转 45° 的薄棱镜片正好把入射光束旋转 90° ,变成沿垂直面分布的光束出射。因此,微片棱镜堆可以把入射光束分割成许多小段,并使原来沿水平方向分布的每一小段都在其原来的位置上旋转 90° ,并沿垂直方向分布并在同一高度上排成一行,改变了两个方向上的拉格朗日不变量。

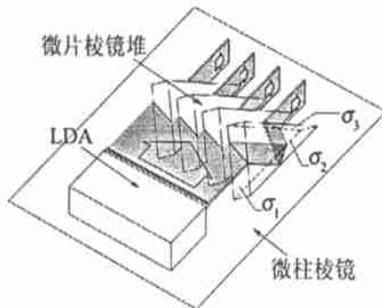


图9 微片棱镜堆示意图

利用微片棱镜堆整形专利技术,已经研制成功 808nm 和 940nm 的单光纤 ($600\mu\text{m}/900\mu\text{m}$) 耦合输出大功率半导体激光泵浦源模块,总体耦合效率不低于 50%,价格低于国外同类商品。

2.7 棱镜组折反射光束整形方法^[1]

美国的 Apollo Instruments 公司最近提出了几种高效的光束整形方法,其中一些还创造了亮度的最高记录。其整形思想利用由棱镜组组成的光束整形器中的棱镜组的折反射将 LDA 光束在慢方向上按照微镜尺寸分成许多段后在快方向重排,结果光

束的拉格朗日不变量在慢方向上被减小 n 倍,而快方向上增加 n 倍,原理如图 6。该方法重排光斑较好,能大大提高 LDA 光束质量,易于实现,结构调整简单,微镜数不受 LDA 节数限制。

其中,一种典型的方法是通过两组棱镜来分割和重排 LDA 光束。第 1 组 n 个棱镜用来将 LDA 光束在慢方向分割成 n 部分后,第 2 组 n 个棱镜用来在快方向上将分割后的 n 部分光束重排列。棱镜组把 LDA 的出射光束沿慢方向分割,并沿快方向重新排列,从而改善了拉格朗日不变量。既用到了棱镜的反射也用到了折射特性。如图 10,两组棱镜中,各片棱镜以斜边为基准,依次按一定间距错位放置,光束在不同位置被截成一段段的。第 1 个棱镜组把出射光束沿慢方向分割成一组光束段,这组光束从棱镜组斜边入射,入射表面的线光源与棱镜组的内表面成一定的角度,在各片棱镜中反射两次后从斜边出射,并沿着慢轴方向被分成很多段,由于棱镜片有错位,所以出射光束段也顺次产生错位。然后出射光进入第 2 个棱镜组,被重新排列输出。结果从 LDA 出射的光被整形成一个光斑,两个方向上的拉格朗日不变量相近。用两组光楔(或折射棱镜)进行光束分割和重排也可得到与 P_5 一样的光斑。



图10 两组棱镜光束整形

这种方法只要将每一片棱镜对准一个发光源,就可消除 LDA 不连续对光束质量的影响,比较成功地解决了光束整形的质量问题。

3 各种整形方法的发展过程及比较

在 LD 的大部分应用中,LD 都和光纤或光纤束耦合成一体的,其一是光纤柔软易弯曲,激光可以方便灵活地通入到窄小空间;其二是光纤耦合可以改善输出光束的质量,同时采用多光纤集束使输出功率得到相对于单管数十倍的提高,且光束传输过程中发散对称性不变。其耦合方式有两种:(1)将阵列中发出的光输入光纤阵列中,然后并束;(2)先将 LDA 发出的光束用专门的整形器整形,使得快慢两个方向光束质量接近,然后耦合到一根光纤里。

最典型、最简单的光束整形方法是用柱面透镜把 LDA 光束聚焦进光纤束中,然后将光纤束排成圆

形通过单光纤输出。因为从 LDA 出射光的模式与光纤的模式无法匹配以及光纤阵列的填充因子受限,这种耦合技术得不到高亮度的光,但因其简单、易操作,所以仍然是一种很常用的光束整形技术。

另一种简单的改善 LDA 光束形状的方法是使用面阵列。这是一种可替代光纤束的方法,成本很低。将若干个带有准直透镜的 LDA 叠加在一起,用一个柱透镜将慢方向的发散角进行准直,再用一个普通照相用的透镜聚焦。面阵列在快方向上拉格朗日不变量增加了,而慢方向却没变,因此,最后光束形状离圆形还差得很远。此外,发光区之间的热沉占据了一定的空间,从而限制了光亮度。

目前所采用的显著提高光束质量最有效的整形方法是用较复杂的光束整形器对光束分割旋转重排,融合了整形和准直两部分,重排后易被聚焦成圆点。目前,国内外竞相开展了 LDA 光束整形技术的研究,陆续提出了一些较好的整形方法。国外已能够将大功率 LDA 耦合进 $400\mu\text{m}$ 的光纤,整体效率达到 70% 以上,商品化的光纤 ($600\mu\text{m}$) 耦合输出大功率 LDA 模块的整体效率可达 50% 以上;而国内由于技术、材料、工艺基础等多方面的原因,这方面的技术相对落后一些,已能将大功率 LDA 耦合进 $600\mu\text{m}$ 的光纤,整体效率大于 50%。表 1 对各种整形方法做了一个简单的比较。

表 1 各种整形方法比较

整形方法	效率	光斑	优点	缺点
光纤转换器	62% (未耦合进光纤)	0.9mm	简单、易操作	得不到高亮度的光
渐变折射率透镜阵列整形	86%		较早提出按 LDA 节准直思想	光束质量不均衡
多棱镜阵列整形	76% (未耦合进光纤)	200 μm	较早提出光束切割旋转重排列整形思想	光学面太多增加了加工调整难度
双反射镜整形	75% (未耦合进光纤)	100 μm	能有效地除掉 LDA 非发光区,可提高亮度	加工调整难度大
阶梯反射镜整形	71%	400 μm	系统易于集成,不需昂贵的元件,调整要求低	阶梯镜表面加工较难
微片棱镜堆线光束整形器	> 50%	600 μm	填补了国内空白	效率偏低
棱镜组折反射光束整形	> 70%	600 μm	重排列光斑较好,亮度高	加工调整难度大

4 结 论

过去,从 LD 出射的光不能在高功率密度条件下被非常精确地聚焦,这就限制了 LD 的一些应用。随着光束整形技术的提出,可以预见今后 LD 应用有更广阔的前景。

参 考 文 献

[1] Wang Zh J, Gheen A Z, Wang Y *et al.* Optical coupling system for

a high-power diode-pumped solid state laser. U S Patent, 6,377, 410. 2002-04-23.

[2] Graf Th, Balmer J E. *Opt Lett*, 1993, 18(16): 1317 ~ 1319.

[3] Yamaguchi S, Imai H. *IEEE J Q E*, 1992, 28(4): 1101 ~ 1105.

[4] Yamaguchi S, Kobayashi T, Saito Y *et al.* *Opt Lett*, 1995, 20(8): 898 ~ 900.

[5] Clarkson W A, Hanan D C. *Opt Lett*, 1996, 21(6): 375 ~ 377.

[6] Ehlers B, Du K, Baumann M *et al.* *Proc SPIE*, 1997, 3097: 639 ~ 644.

[7] 陆雨田, 刘立人, 江建中 *et al.* 线光束整形装置. 中国发明专利: ZL99124019. 2000-05-17.

简 讯

利用纳米粒子设计硅基发光二极管

尽管硅的非间接带隙使它不能按常规方法来制造发光二极管,但全世界的科研小组都试图合作解决这个问题,希望最终能生产硅基发光二极管及其它一些可以大批量生产的光电材料,就像如今大批量生产集成电路一样。2003 年 1 月 25 号到 31 号在加州圣琼斯举行的西部光电研讨会上,来自台湾大学的科学家为大家阐述了他们的两个想法(尽管这两个方法都还没有生产出有效的发光体)。一个方案是,将直径为 $8\text{nm} \sim 12\text{nm}$ 的 SiO_2 纳米粒子层放置在背面为电镀铝层和前面为镀银层之间的硅上。放至电场之后,银移进纳米粒子层。尽管效率仅仅是 1.5×10^{-4} ,但仍可以通过直径为 1mm 的器件看到近似激发的现象,其光谱显示了谐振峰值。另外一个方案是,将悬空的 5nm 大小的硫化镉粒子固定于硅底层之上(室温下抽真空,使微粒位置固定),在 571nm 处发光,光谱的 FWHM 为 29nm ,效率近似为 10^{-5} 。

(蒋 锐 叶大华 供稿)