

大功率半导体激光器阵列光束整形新进展

Progress on Beam Shaping of High-Power Laser Diode Arrays

俞建杰¹ 谭立英¹ 马晶¹ 杨玉强^{1,2}

1 哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨, 150080

2 哈尔滨理工大学 应用科学学院, 黑龙江 哈尔滨, 150080

Yu Jianjie¹ Tan Liying¹ Ma Jing¹ Yang Yuqiang^{1,2}

1 National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology,
Harbin Heilongjiang 150080, China

2 Institute of Application Science, Harbin University of Science and Technology, Harbin Heilongjiang 150080, China

摘 要 大功率半导体激光器阵列(LDA)的应用日益广泛,但受其发光机制的限制,光束质量较差。为满足应用要求,必须对 LDA 光束进行整形处理。介绍了 LDA 光束整形的基本原理和关键技术,按照光束传播特性的不同,将整形技术分为两大类,即几何光学光束整形和衍射光学光束整形方法进行了阐述。在阐述典型例子的基础上,分析和比较了各种整形方法的优点和不足。

关 键 词 激光技术; 几何光学; 半导体激光器阵列; 光束整形; 衍射光学

Abstract The application of high-power laser diode arrays (LDA) is becoming wider and wider, but the quality of output beams from LDA is poor for its unique mechanism of luminescence. In order to meet the requirements on beam quality in various applications, it must transform laser light into required profile or distribution. After introducing the principle of beam shaping and key techniques, we summarize the technology for LDA beam shaping, and analyze and compare advantage and shortcoming in all kinds of beam shaping technologies according to different propagation characteristic of light beams.

Key words laser technology; geometrical optics; laser diode arrays; beam shaping; diffraction optics

中图分类号 TN248.4

1 引言

大功率半导体激光器阵列(LDA)具有电光转换效率高、体积小、重量轻、寿命长、功耗低、可靠性好、结构简单、易于调制及价格低廉等优点,随着半导体工业和其他相关领域的不断发展, LDA 广泛应用于光电子学的诸多领域,成为当今光电子科学的核心技术。

LDA 的应用方式通常可分为两种:一种作为抽运固体激光器的抽运源,另一种是直接利用 LDA 的辐

射。无论哪种应用方式,都对 LDA 的光束质量有很高要求。但与其他激光器相比, LDA 的光束质量较差,光束发散角很大,且存在本征像散,远场光强分布呈椭圆高斯型。为满足应用要求,通常必须对 LDA 光束进行光束整形处理,即对光束采取准直、消像散和圆化等整形手段,使光束发散角、光束形貌、光功率密度分布等满足实际使用要求。如激光焊接等应用要求将 LDA 光强分布由椭圆高斯型整形成空间高密度高斯

或均匀分布。

随着 LDA 的应用日趋广泛,其光束整形问题逐渐成为相关领域的研究热点^[1-16],有各种各样的光束整形方法用于提高 LDA 的光束质量。最简单的 LDA 光束整形方法当属(微)柱透镜整形方法,能较有效地完成 LDA 光束准直功能。此后针对 LDA 的多节构造,日本 Yamaguchi 等^[17]于 20 世纪 90 年代初提出用梯度折射率透镜(GRIN)透镜阵列按 LDA 节分割、整形的方法,使光束在准直的同时改善了光功率密度分布。瑞士的 Graf 等^[18]发明的光纤转换器很好地继承了分割整形的优点,而 Ullmann 等^[19-23]提出的 LDA 整形方法也都基于这种按节分割并用透镜准直的思想。Yamaguchi 等^[24]还提出多棱镜阵列光束整形方法,将光束按 LDA 节分割、旋转和重排,均衡了 LDA 快慢轴(见后节)上的光束质量,提高了光功率密度。其后英国 Clarkson 等^[25]发明的双发射镜整形技术,德国夫琅和费实验室 Ehlers 等^[26-31]发明的阶梯镜组整形技术,美国 Appollo 公司^[32]提出的棱镜组整形技术和中科院上海光机所提出的微片棱镜堆整形技术^[33]等都不同程度地借鉴了这种思想,其重点都在于光强分布和光功率密度分布的改善。Leger 等^[34]则从光束传播的另一角度提出 LDA 光束整形的新方法,即闪耀光栅光束整形方法,该方法实现了复杂波形的变换。其后周崇喜等^[35,36]发扬了这种光栅整形的方法,并得到能量更集中,尺寸更小的聚焦光斑。而 Skeren 等小组则发展了微光学光束整形的另一分支——衍射光学元件光束整形^[37-40],Heinemann 和 Pawlowski 等课题组则使用了折/衍射混合元件进行该方面的深入研究^[27,41]。

如上所述,LDA 的光束整形方法已在激光应用学科中形成研究热潮,但各种方法和技术互有优劣,并缺乏有效的分类和综述。本文从光束传播的角度,将这些整形方法分为几何光学整形方法和衍射光学整

形方法两大类进行详细阐述,并以光束形貌和光功率密度分布的改善为重点,分析和比较各类整形方法的优点和不足,以期得到优化的解决方案。

2 LDA 光束整形原理及关键技术

典型的 LDA 结构(见图 1)具有以下特征^[42-46]:发光区尺寸为 $1\text{ mm} \times 10\text{ mm}$;光束存在本征像散,出射光束非回旋对称,其远场的强度分布呈椭圆高斯型;光束在垂直和平行于 P-N 结两方向(俗称快轴和慢轴)上的发散角很大且不对称,快轴方向发散角一般为 $36^\circ \sim 40^\circ$ (半峰全宽),慢轴方向一般为 $8^\circ \sim 12^\circ$ (半峰全宽);快轴方向光束质量接近衍射极限,为基横模高斯分布,慢轴方向光束质量极差,为多模厄米-高斯分布。

LDA 激光束的光束质量一般采用光束质量因子 M^2 予以表征^[47],它正比于光束的束腰 d 和发散角 q 的乘积: $M_x^2 = \frac{p}{1} \frac{d_{x0} q_x}{4}$, $M_y^2 = \frac{p}{1} \frac{d_{y0} q_y}{4}$ 。由 LDA 结构可知,LDA 光束在快慢两轴上的光束质量相差极大,通常 $M_x^2 > 1000$, $M_y^2 \approx 1$ 。LDA 光束整形的目的就是准直光束,改善慢轴方向的光束质量(即减小 M_y^2),并改善光功率密度分布。

LDA 光束整形通常分为三部分,即准直、整形和耦合。第一部分就是将 LDA 光束准直成准平行光,该部分功能由快轴准直器和慢轴准直器组合完成,快轴准直器通常为数值孔径较大的微柱非球面镜,慢轴准直器则是对应于 LDA 节的微柱透镜,LDA 光束经准直后,快慢轴上的发散角很小且近似相等,但光束宽度仍有较大差异;第二部分的目的就是均衡快慢轴的光束质量,因此通常需要进行光束变换,在发散角前后基本不变的前提下,完成束宽整形和光场分布的变换;第三部分通常与应用要求相结合,如医疗、焊接等领域就要求将光束耦合进光纤后才能使用。本文的重

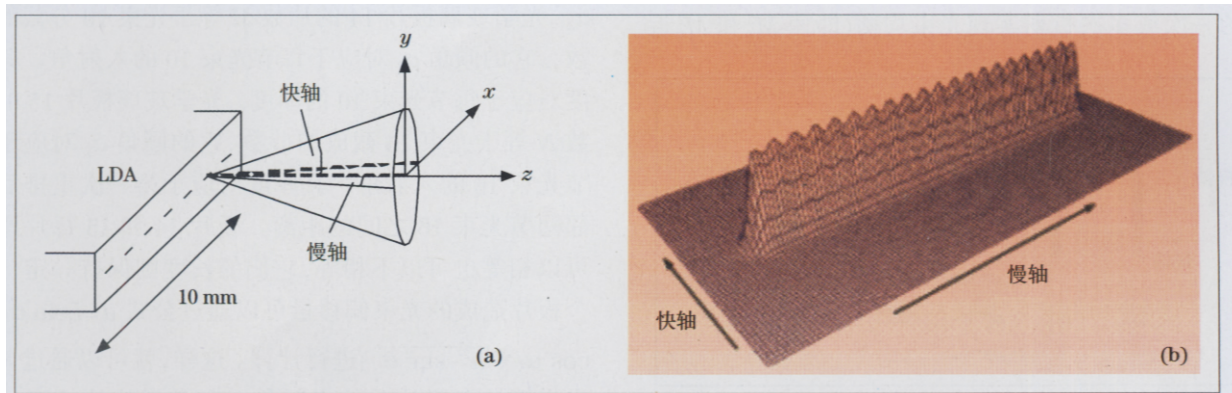


图 1 半导体激光器阵列几何结构和光束形貌 (a) 结构; (b) 光束形貌

点在于第二部分,其设计前提为准平行光入射,讨论重点是 LDA 光功率密度的改善。

光束整形的关键技术主要包括:1) 由于 LDA 光束在快轴方向上的发散角很大,用于准直快轴发散角的微柱透镜的数值孔径必须很大,同时微透镜与 LDA 的几何尺寸及两者之间的距离都很小,因此微柱透镜的设计、加工、安装和调整都非常关键;2) LDA 光束为多模分布,回旋对称性较差,整形的同时保证效率难度很大;3) 在需要将光束耦合进光纤的应用中,为提高耦合效率,必须使整形之后光束的光束质量因子小于光纤的光束质量因子;4) 在特殊应用场所,必须设计 LDA 光束整形器使其得到特殊光场分布。

3 LDA 光束整形技术

按照设计理论的不同, LDA 光束整形可分为两大类,即基于几何光学原理的几何型 LDA 光束整形方法和基于衍射光学原理的衍射型 LDA 光束整形方法。

3.1 几何型 LDA 光束整形技术

基于几何光学的 LDA 光束整形方法是根据光束的折反射原理,建立输入光与输出光间的映射关系方程,通过透镜、棱镜、反射镜及非球面镜等的合理使用,并通过光束入射角、介质折射率、厚度及相对位置等参量的准确控制,完成光束整形过程。由于通常的光学成像系统不能改变光束的质量因子,几何光学光束整形的实质是通过 LDA 光束的分割、旋转和重排^[24, 32](见图 2),使慢轴方向的光束质量因子减小至原先的 $1/n$ 倍,同时使快轴方向的光束质量因子增大至原先的 n 倍,即牺牲快轴方向的光束质量,以提高慢轴方向的光束质量,达到两方向上的光束质量均衡。几何光学整形方法可进一步细分为折射整形法、反射整形法和折/反射混合整形法。

3.1.1 折射整形法

折射式整形方法设计简单,它利用光学元件对光束的一次或多次折射实现光束均衡(即使 M_x^2 和 M_y^2 近

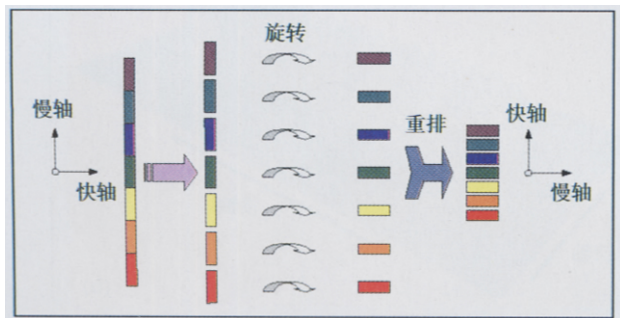


图 2 LDA 光束重组示意图

似相等),是最早应用于 LDA 光束的整形方式之一。能实现折射式 LDA 光束整形的光学元件很多,包括 GRIN 透镜阵列^[17]、微柱透镜阵列^[19-23]、棱镜组合^[33, 48]、光学玻璃板片堆^[49]、分束堆置折射器^[50]等。

GRIN 透镜整形技术是由日本钢铁公司的 Yamaguchi 等^[17]发明的,它采用 GRIN 透镜阵列将光束按照 LDA 节分割准直,然后聚焦。该方法没有重排子光束,但它通过透镜阵列对每个 LDA 分别准直而提高了 LDA 的光束填充因子,结果使慢轴方向的光束质量得以提高。该方法由于较早提出按照 LDA 节分割准直的整形思想而受到重视。

武汉凌云光电有限公司发明的线形光束折射整形器^[50]继承了分割整形的思想,如图 3 所示,该整形装置由两组正交放置的光学玻璃板片堆组成。

整形功能模块 11 将入射光束 10 沿慢轴方向分

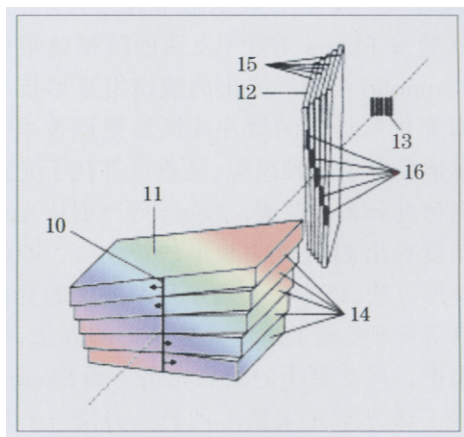


图 3 折射式光束整形器示意图

割,并沿快轴方向错位排列。功能模块 12 则进一步偏折光束 16 使其沿慢轴方向进行重排,从而使出射光变成具有一定形状的光束 13。作为整形关键部件的功能模块 11 和 12 分别由多个光学玻璃板片 14 和 15 紧密排列而成,各板片之间各自具有一定倾角 α_1 和 α_2 。光学玻璃板片 14 的片数 M 等于光束 10 分截的节数,它的倾角 α_1 对应于每节光束 10 的入射角,其厚度对应于每节光束 10 的厚度。光学玻璃板片 15 的片数 N 等于光束 16 截成的节数,它的倾角 α_2 对应于每节光束 16 的入射角,其厚度对应于第一次重排后相邻两节光束 16 之间的距离。板片 14 和 15 每片厚度可以相等也可以不相等,它们的长度则保持一定。每个板片造成的光束偏移量可以通过公式 $d=L\sin \alpha(1-\cos \alpha/\sqrt{n^2-\sin^2 \alpha})$ 进行计算。这样,就可以通过调节光束到达各板片时的入射角 α 和各板片的长度 L 来

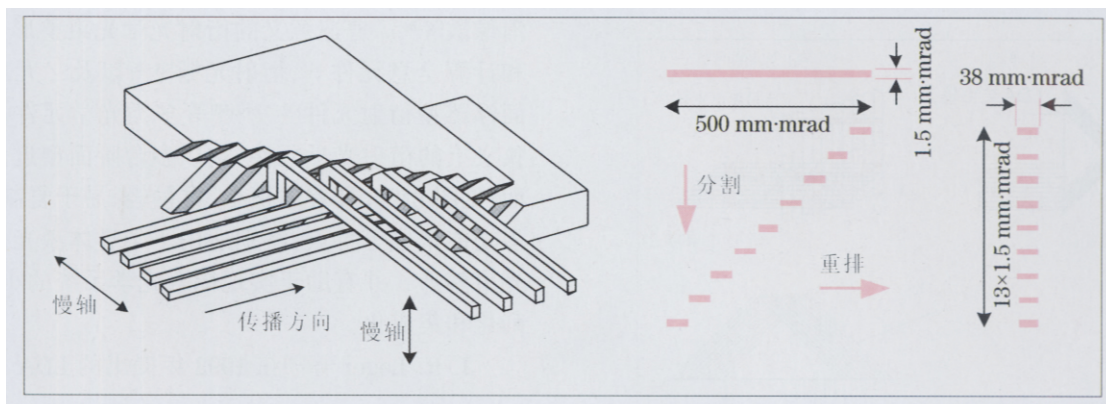


图4 阶梯镜组光束整形原理

控制光束在快轴水平和慢轴方向的位移量 d , 从而使线形或椭圆形光束变成圆形分布的光束。

2003 年, 美国的 Faithcloth^[51] 提出用分束堆置折射器实现光束整形。它首先使用微棱镜分别对快轴和慢轴光束进行准直, 然后通过矩形立方玻璃偏移快轴方向光束, 再经过与光轴方向呈 45° 放置的直角平板对移动慢轴和快轴光束, 最后通过偏振耦合系统完成光束尺寸转换, 该系统成功地将 1000 W 的激光能量耦合入纤径为 1 mm, 数值孔径为 0.2 的光纤中。

3.1.2 反射整形法

反射式整形方法引入全反光学元件, 使 LDA 光束经过若干次反射后, 快慢轴方向上的光束宽度发生变化, 以至满足使用要求。该方法包括光纤转换器^[16]、双反射镜^[25]、阶梯镜组^[26-31]等。

光纤转换器是最简单的光束整形技术, 它采用光纤阵列将光束按 LDA 横模进行分割, 将光纤在靠近 LDA 的一端排成线阵, 另一端则排成束状, 利用光纤的内反射将光束圆化。该方法使用简单, 但光纤对准过程较为繁琐, 整形效率不高。

双反射镜整形技术则是采用两个高反平面镜, 使其相距很近, 相互平行, 且在平行于镜面的两方向上相互错位, 从而将光束按照镜间错位距离分割, 分段重排, 实现光束整形。该方法能有效保持光束亮度, 但体积较大, 装配复杂。

阶梯镜组光束整形方法由德国夫朗和费激光技术所发明^[28], 该方法采用阶梯反射镜将光束按照镜面尺寸分割、旋转和重排, 能有效均衡 LDA 快慢轴方向上的光束质量。

如图 4 所示, 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 个高反射率反射镜组成。第 1 组阶梯镜每个镜面都绕慢轴倾斜 45° ; 相邻镜面

在沿光束传播方向上的间隔距离为常数 d , 该常数 d 与快轴方向的准直宽度和单个镜面的宽度相等。第 2 组阶梯镜与之类似, 且两组阶梯镜的镜子都一一相对。经快轴准直后的线形光束入射到第 1 组阶梯镜的反射面上时, 会被这些镜面沿慢轴分割为 N 份, 实现第一次光束重排; 重排后的光束沿快轴方向反射, 再经过第 2 组阶梯镜反射, 实现第二次光束重排。第一次重排的结果是分割后的数节光束在光束传播方向上实现不同量的平移; 第二次重排的结果是实现光束在另一个方向上的平移。经过阶梯镜组的分割和重排后, 原先沿慢轴方向排列的线形光束变成沿快轴方向排列的矩形光束, 且在光传播方向上光场分布接近均匀分布。由于整形前后光束发散角不变, 而快慢轴方向上的光束宽度产生了变化, 因此平衡了快慢轴上的光束质量因子。该装置的光-光效率可达 85%^[30], 光斑尺寸小于 $5 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$, 功率密度为 20 kW/cm^2 。

Stefano 等^[31]在阶梯镜组的基础上进行了改进, 将反射镜的摆放位置和方向作适当变化, 使各子光束之间的光程差恒定, 从而提高了光束亮度。牛岗等^[52]利用该整形技术和偏振合束及波长合束技术成功地将波长不同的 LDA 进行混合, 并将 LDA 光束耦合进纤径 400 μm , 数值孔径为 0.22 的单光纤中, 其耦合效率为 60%。

3.1.3 折/反射整形法

折/反射混合整形方法采用棱镜和反射镜的各种组合, 使光束经过若干次折射和反射后, 光场分布发生改变, 光束质量得以改善。该方法的典型方式包括多棱镜阵列^[24, 33]和棱镜组^[32]等。

美国 Apollo Instruments 公司提出的棱镜组整形方法是最具代表性的折/反射混合整形方法, 该方法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 光束在慢轴方向上按照微镜尺寸分割成许

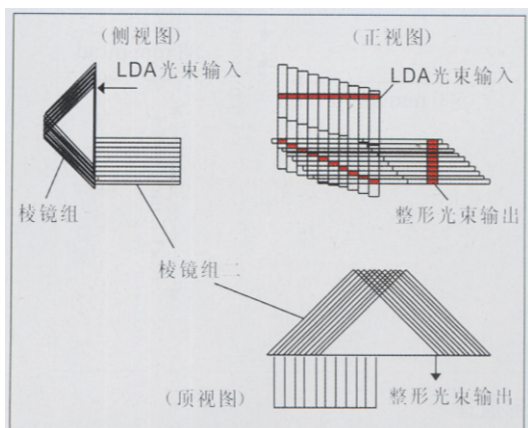


图5 棱镜组整形方法示意图

多段后在快轴方向重排,结果光束慢轴上的光束质量因子被减小 n 倍,而快轴上增加 n 倍。

图5为棱镜组光束整形的其中一种实现形式^[32],整形器件由两个棱镜组组成,两个棱镜组相互正交,并且每个棱镜组中的每片棱镜都以斜边为基准,依次按一定间距错位放置。出射自LDA的线形光束经过准直后从第一个棱镜组的斜边入射,在各片棱镜中反射两次后从斜边出射,这样,线形光束在慢轴方向按照棱镜厚度被分成很多段,同时由于棱镜片有错位,出射光束段也顺次产生错位。然后出射光进入第二个棱镜组,通过同样的原理在第二个棱镜组中完成两次全内反射后从斜边出射。由于整形前后光束发散角变化很小,而快慢轴方向的尺寸分别增加到原先的 n 倍和减小到原先的 $1/n$,因此,从LDA出射的线形光束被整形成在快慢两方向上的光束质量因子都近似相等的光斑,从而平衡了两方向上的光束质量。利用该方法实现LDA光纤耦合产品已经商品化,其亮度高于 $1 \text{ mW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{str})$,并创造了当时的亮度记录。用两组光楔(或折射透镜)进行光束分割和重排也可得同样的整形光斑。

3.2 衍射型 LDA 光束整形技术

衍射型 LDA 光束整形方法是基于光波的干涉和衍射原理,通过调整衍射元件的高度、深度、宽度等参量,使 LDA 光束经过衍射面后,传播方向和能量分布等产生变化,达到改善光束质量的目的。衍射光学整形方法可进一步细分为纯衍射型和折/衍射混合型光束整形方法。

3.2.1 衍射整形法

近年来,使用衍射光学元件进行激光束空间域整形的技术发展很快,该技术能成功地将椭圆高斯光束变换为均匀圆光束,并能将椭圆像散光束准直成圆且

消像散^[52, 53]。普遍意义的衍射光学光束整形包含全息和计算全息元件^[54]、衍射光栅^[34-36]以及二元或多级表面浮雕型衍射元件^[37-40, 55, 56]等多类光学元件。后者为狭义上的衍射光学元件,它以多台阶面型近似连续表面(见图6)^[58],具有体积小、重量轻、易于复制、可实现多功能集成等特点,特别适用于半导体激光器阵列的光束整形,并有助于实现耦合光学系统的小型化、阵列化和集成化。

J. R. Leger 等^[34]在 1992 年提出的 LDA 光束整形

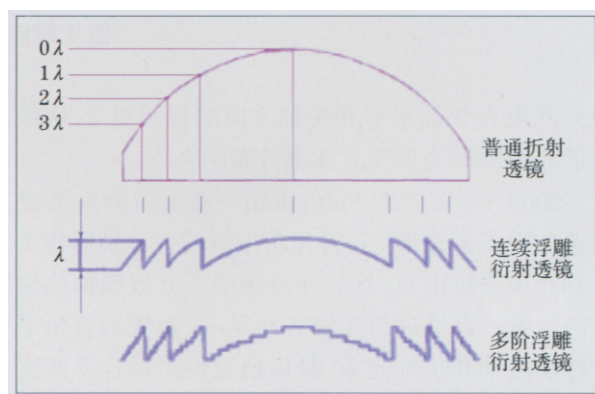


图6 折射透镜到二元浮雕结构的演变

技术是衍射型光束整形的典型例子,其光学实现如图7所示。首先,将LDA均分成 N 个子单元,每个子单元包括 M 个小激光器。然后,分别用 N 个双焦距的偏心菲涅尔透镜来对这些子单元的出射光束进行变换。这些透镜在同一平面内矩形密接。经过变换后, N 个子单元的出射光束由线阵排列变为矩形排列,且快慢轴方向的发散角得到了压缩,通过选择合适的器件参量,可以使每束光在快慢轴方向的光斑大致相同。由于此时各光束的传播方向偏离了系统的光轴方向,所以仍需要进行校正。用 N 个特殊的衍射光学元件来同

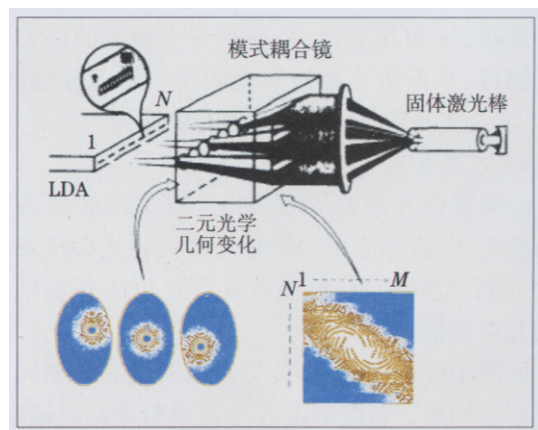


图7 衍射光学光束整形装置

时校正光束在快慢轴方向的传播方向,使之偏折回系统的光轴方向。这些衍射光学元件位于同一平面,每个器件相当于透镜和棱镜的组合。经过上述变换后,各出射光束近似为平行光,输出光场截面为矩形,且填充比较高,因而光强均匀性较好。与成像系统光束整形不同的是,衍射光学整形系统可以针对每个子单元进行变换,而不是针对每束光进行变换的,因此也适用于线阵中发光区个数较多的情况。

目前,由于材料和加工工艺方面的局限,应用纯衍射方法完成的商用 LDA 光束整形装置还鲜有报道,已报道的有中科院成光所制作的闪耀光栅阵列型整形器件^[39],其整形后的快慢轴光参量积在 $10 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$,经聚焦后能与芯径为 200 mm ,数值孔径为 0.22 的多模光纤耦合。

3.2.2 折/衍射整形法

折/衍射光束整形器是指由传统折射元件和衍射元件混组,并完成整形功能的光学系统。它包含两类情况,第一类情况中折射元件和衍射元件相互独立,如 1992 年 R. Goering 等提出的 LDA 光束整形器^[27];第二类情况是折射和衍射面位于同一透镜的前后表面,如 E. Pawlowski 等发明的折/衍混合透镜^[41]。

图 8 为德国 R. Goering 等设计的以相互独立的折射和衍射元件组成的 LDA 光束整形系统^[27],它用于端面抽运固体激光器。图中 x 、 y 、 z 方向分别为慢轴、快轴和光束传播方向。光束整形的第一步是用 GRIN 微柱透镜对快轴方向进行准直,同时实现光束在 y 方向的偏转。让 GRIN 透镜在 x - y 平面内沿 z 轴旋转一定的角度,这样线阵中的各光束通过此透镜后不仅能实现快轴方向的准直,还会在 y 方向偏转不同的角度,经过一段距离的传输后这些光束就会 y 方向分开。然后,用一个消色差的双胶合透镜对线阵中的各光束成像,使各光束在 x - z 平面内偏转。此透镜相当于一个偏转器,使得经过快轴准直后向在 y 方向偏转的光束通过此透镜后同时向 x 方向偏转,在透镜的焦平面处,这些光束在 x 方向彼此重合,可以通过控制光束的偏转角度,使此位置处光束同时在 y 方向分开,就能得到一个近似方形的二维光场分布,提高了光场的对称性,但此时各光束的传播方向都偏离了光轴方向,还需进行光束的方向校正。校正部分的工作由透射式闪耀光栅阵列完成,光栅阵列校正光束在 x 方向的传播方向,使之平行于 z 轴。闪耀光栅相当于一个反偏器,使各光束通过它后传播方向回到 z 轴方向。最后,采用双胶合透镜校正光束在 y 方向的传播

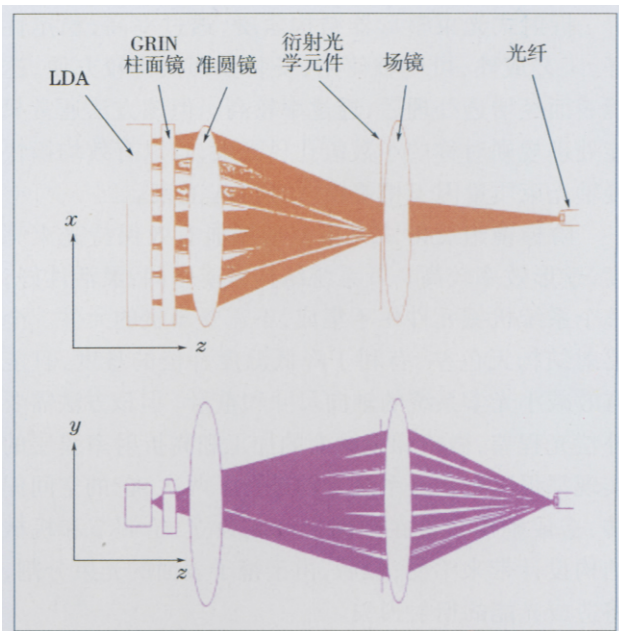


图 8 利用 GRIN 透镜和光栅实现 LDA 光束整形的成像装置^[41]

方向,同时实现慢轴方向的准直,经该透镜后,快慢轴方向的光束均被准直,传播方向平行于 z 轴,这样就得到了一个低发散,矩形截面的输出光场,实现光束整形目的。

2005 年, Pawlowski 等^[41]发明的折/衍混合柱透镜由位于前表面的衍射面和后表面的柱面构成,如图 9。该透镜的衍射面由多个子面构成,分别用于光束预准直、整形和装配监控等功能。该透镜能很好地校正 LDA 的光学像差和缺陷(如 smile 效应),并具有生产成本低、制造精度高、装配和调试方便等特点。但由于该专利没有相应的实施案例,故不能准确评价该设计的有效性。

4 LDA 光束整形技术比较

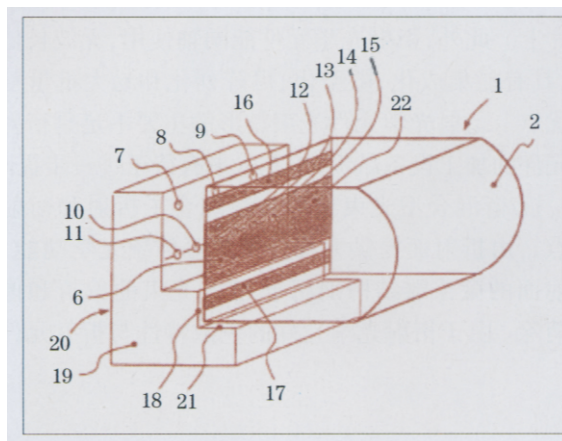


图 9 折/衍射混合透镜

折射式光束整形器结构紧凑,透过率高,稳定性好,工艺成熟,可同轴使用,安装和调试比较方便;透镜表面经增透处理后,透过率较高。但该方法通常只能处理规则对称的小数值孔径光束,难以有效均衡快慢轴光束质量因子相差较大的 LDA 光束。

阶梯镜组反射式光束整形器能有效保持光束亮度,整形效率较高。其系统结构紧凑坚固,灵活性好,整个系统机械元件易于集成,不需要昂贵的元件。全反射结构无色差,有利于降低温度补偿的难度,且能有效减小光学系统的轴向尺寸和重量。但该方法需要补偿光程差,微阶梯镜镜面的加工和高折射率膜层的实现都很困难;且系统光轴进行了两次 90° 的空间偏转,造成整形元件在空间上彼此独立,给调节和机械结构设计带来不便;最后,由于镜子表面的光束分割,将造成光能的衍射损失。

棱镜组整形方法综合了折射和反射的特点,结构调整简单,易于实现,微镜数不受 LDA 节数限制,重排光斑较好。但是该方法依然存在许多不足:(1)光束分割受棱镜厚度限制,整形光束亮度无法进一步提高;(2)分割光束的排列距离也受到棱镜厚度的限制,无法调整分割光束间的距离;(3)棱镜加工和侧面镀膜难度大;(4)折反次数较多,势必造成光斑的弥散,致使传输效率减小,激光输出亮度降低;(5)光轴偏转次数更多,致使光学系统尺寸很大,同样存在调节不便,组装操作麻烦等问题;(6)该系统还可能产生额外像差。

衍射光学元件原则上能实现任意不规则面型透镜,能突破传统折反射元件光束整形的理论限制,实现其难以具备的光学功能。衍射光学元件具有体积小、重量轻、特征尺寸小、理论衍射效率高、色散矫正能力好、设计自由度高、材料可选性广等优点。同时由于衍射光学元件的加工采用与大规模集成电路类似的光刻工艺,因此与 LDA 间的集成化较高,可将其刻写在同一基片上。此外,衍射光学元件能同轴使用,无波长依赖性,具有能集成化、微型化、可阵列化和易大批量复制等优点。衍射光学元件光束整形的主要不足是衍射光学元件的加工设备昂贵,工艺水平有待于进一步提高。

折/衍混合型光束整形方法综合了折射和衍射的优点,由折射面提供大部分聚焦等传统光学功能,而衍射面的微浮雕结构则用于 LDA 光束的偏折和像差的消除。由于衍射光学元件的色散特性与折射元件相

反,具有与材料的无关性和负向性,因此非常利于色差的消除。混合透镜中的衍射面分担了光焦度,有利于减小单色像差。

目前,能显著提高光束质量的 LDA 光束整形方法大多为几何型方法,这些方法一般都融合了准直和整形的功能,并采用较复杂的光束整形器对光束进行分割、旋转和重排,聚焦成圆斑后直接使用或耦合进光纤。而基于衍射原理的整形方法由于加工设备和工艺水平的原因,迟迟未能表现出任意波前的理想变换和理论上的高效率。然而,随着应用需求和工艺水平的不断提高,基于纯衍射或折/衍混合的光束整形手段,将在 LDA 光束整形领域占据领导地位。笔者认为,采用高效快轴准直器、慢轴尺寸压缩器以及折/衍混合元件的组合将能有效解决光束整形问题,即首先用快轴准直器压缩发散很快的快轴光束,接着用慢轴压缩器减小慢轴光斑尺寸,其后用具有衍射结构的微光学器件改变光束在两个方向上的光束质量因子,最后再用非球面透镜聚焦后直接或耦合使用。

5 结论和展望

现有的基于折射原理的 LDA 光束整形技术设计简单,工艺成熟,但重量和体积较大,透过率和整形效率较低,且难以实现光束的特殊转换;基于衍射原理的 LDA 光束整形技术能实现任意波前变换,能与 LDA 无缝集成,且具有体积小、重量轻、微型化、阵列化等优点,但目前的工艺水平还有待提高。基于本文分类的各种整形方法各有优劣,实际工程应用需根据激光器的实际设计指标,综合考虑效率、体积、重量、费效比等多方面因素,选择最佳整形方式。随着半导体技术、计算机微图形结构设计、微型三维形体的光刻技术和直写技术,以及精细加工技术和材料技术的发展,基于衍射原理的光束整形方法必将在 LDA 光束整形及其相关领域发挥越来越重要的作用。

收稿日期:2007-11-22

基金项目:哈尔滨工业大学优秀团队支持计划。

作者简介:俞建杰(1980-),男,浙江人,博士研究生,主要从事光束整形和衍射光学研究。

E-mail:yjjhit@163.com

导师简介:谭立英(1957-),女,山东人,教授,主要从事卫星光通信和小波光学研究。

E-mail:majing@hit.edu.cn

— 参考文献 —

- 1 F. M. Dickey, S. C. Holswade. Laser beam shaping: Theory and Techniques [M]. New York: Marcel Dekker, 2000
- 2 F. M. Dickey, S. C. Holswade. Laser beam shaping [C]. SPIE, 2000, 4095
- 3 F. M. Dickey, S. C. Holswade, D. L. Shealy. Laser beam shaping II [C]. SPIE, 2001, 4443
- 4 F. M. Dickey, S. C. Holswade, D. L. Shealy. Laser beam shaping III [C]. SPIE, 2002, 4770
- 5 F. M. Dickey, D. L. Shealy. Laser beam shaping IV [C]. SPIE, 2003, 5175
- 6 F. M. Dickey, D. L. Shealy. Laser beam shaping V [C]. SPIE, 2004, 5525
- 7 F. M. Dickey, D. L. Shealy. Laser beam shaping VI [C]. SPIE, 2005, 5876
- 8 F. M. Dickey, D. L. Shealy. Laser beam shaping VII [C]. SPIE, 2006, 6290
- 9 F. M. Dickey, D. L. Shealy. Laser beam shaping VIII [C]. SPIE, 2007, 6663
- 10 高欣, 薄报学, 曲轶等. 808nm 波长阵列半导体激光器单光纤耦合输出[J]. 中国激光, 2006, 33(supp1.):56~58
- 11 Wei Huang, Xiaodong Zeng, Yuying An. Study on the beam shaping of high- power laser diode bars [J]. Chinese Opt. Lett., 2003, 1(8):475~476
- 12 郭明秀, 沈冠群, 陆雨田. 激光二极管光束整形技术[J]. 激光技术, 2003, 27(4): 357~361
- 13 周崇喜, 刘银辉, 谢伟民等. 大功率半导体激光器阵列光束光纤耦合研究[J]. 中国激光, 2004, 31(11):1296~1300
- 14 高全华. 大功率半导体激光器光束整形技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 硕士学位论文, 2005
- 15 熊玲玲. 半导体激光二极管阵列的光束整形[D]. 重庆: 重庆师范大学, 硕士学位论文, 2006
- 16 孔媛媛, 曾晓东, 安毓英. 大功率 LD 阵列光束整形技术研究[J]. 光电子·激光, 2006, 17(4):406~409
- 17 S. Yamaguchi, H. Imai. Efficient Nd: YAG laser end- pumped by a 1cm aperture laser diode bar with a GRIN lens array coupling [J]. IEEE J. Quantum Electron., 1992, 28(4):1101~1105
- 18 Th. Graf, J. E. Balmer. High- power Nd: YLF laser end pumped by a diode- laser bar [J]. Opt. Lett., 1993, 18(16): 1317~1319
- 19 C. Ullmann, V. Krause, A. Kisters. Optical arrangement for use in a laser diode system [P]. U S Patent, 5,808,803, 1998- 09- 15
- 20 E. L. Wolak, J. G. Endriz. Packaged laser diode array system and method with reduced asymmetry [P]. U S Patent, 6,044,096, 2000- 03- 28
- 21 R. Goering, P. Schreiber, T. Possner. Optical array for symmetrization of laser diode beams [P]. U S Patent, 6,151, 168, 2000- 11- 21
- 22 R. Goering, P. Schreiber, S. Heinemann et al.. Optical arrangement for balancing the beam of one or more high power diode lasers arranged one above another [P]. U S Patent, 6,337,873 B1, 2002- 01- 08
- 23 P. Grenier, Y. Taillon, Min Wang et al.. Laser beam transformation technique for high- power laser diode linear arrays [C]. SPIE, 2006, 6104:61040R
- 24 S. Yamaguchi, T. Kobayashi, Y. Saito. Collimation of emissions from a high- power multistripe laser- diode bar with multiprism array coupling and focusing to a small spot [J]. Opt. Lett., 1995, 20(8):898~900
- 25 W. A. Clarkson, D.C. Hanna. Two- mirror beam- shaping technique for high- power diode bars [J]. Opt. Lett., 1996, 21(6):375~377
- 26 B. Ehlers, K. Du, M. Baumann et al.. Beam shaping and fiber coupling of high- power diode laser arrays [C]. SPIE, 1997, 3097:639~644
- 27 S. Heinemann, L. Leininger. Fiber coupled diode lasers and beam- shaped high- power stacks [C]. SPIE, 1998, 3267: 116~124
- 28 F. Dorsch, P. Hennig, M. Nickel. High- brightness fibre- coupled diode laser module [C]. SPIE, 1998, 3285:192~198
- 29 Keming Du, P. Loosen. Arrangement for guiding and shaping beams from a rectilinear laser diode array [P]. U S Patent, 5,887,096, 1999- 03- 23
- 30 M. Traub, H. D. Hoffmann, H. D. Plum et al.. Homogenization of high power diode laser beams for pumping and direct applications [C]. SPIE, 2006, 6104:61040Q
- 31 Stefano Bonora, Paolo Villoresi. High- efficiency high- power diode laser beam shaping and focusing with constant optical- path length equalization [C]. SPIE, 2006, 6184:61841Q
- 32 Zhijiang Wang, A. Z. Gheen, Ying Wang. Optical coupling system for a high- power diode- pumped solid state laser

- [P]. U S Patent, 6,377,410 B1, 2002- 04- 23
- 33 石 鹏, 李小莉, 张贵芬 等. 大功率激光二极管的微片棱镜堆光束整形和光纤耦合输出 [J]. 光学学报, 2000, 20(11): 1544~1547
- 34 J. R. Leger, W. C. Goltsov. Geometrical transformation of linear diode- laser arrays for longitudinal pumping of solid- state lasers [J]. IEEE J. Quantum Electron., 1992, 28(4):1088~1100
- 35 Zhou Chongxi, Zheng Chunyan, Zheng Guoxing et al.. High- power LDA beam transformation using diffractive grating array [C]. SPIE, 2005, 5036:73~77
- 36 郑春艳, 郑国兴, 周崇喜 等. 闪耀光栅阵列用于半导体激光器阵列光束整形[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(S0):62~66
- 37 M. Skeren, I. Richter, P. Fiala. Design of binary phase- only diffractive optical elements for laser beam shaping [C]. SPIE, 2000, 4095:154~164
- 38 H. P. Herzig, A. Schilling, L. Stauffer et al.. Efficient beam shaping of high- power diode lasers using micro- optics [C]. SPIE, 2001, 4437:134~141
- 39 S. N. Toma, A. alexandrescu, D. Apostol et al.. Gaussian to rectangular laser beam shaping using diffractive optical elements [C]. SPIE, 2005, 5972:59721G
- 40 姬 扬, 张静娟, 姚德成 等. 用于半导体激光器光束整形的衍射光学元件的设计研究[J]. 物理学报, 1996, 45(12): 2028~2034
- 41 E. Pawlowski, M. Brinkmann, W. Beier et al.. Refractive- diffractive hybrid lens, in particular for beam shaping of high power diode lasers [P]. U S Patent, 2005/0168837 A1, 2005- 08- 04
- 42 X. Zeng, A. Naqwi. Far- field distribution of double- heterostructure diode laser beams [J]. Appl. Opt., 1993, 32: 4491~4494
- 43 江剑平. 半导体激光器[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000
- 44 吕百达. 激光光学[M]. 成都: 四川大学出版社, 1992
- 45 吕百达. 强激光的传输和控制[M]. 国防工业出版社, 1999
- 46 李宾中, 陶向阳, 吕百达. 高功率激光二极管线性阵列光束特性的研究[J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2003, 27(2): 95~98
- 47 E. Siegman. New developments in laser resonators [C]. SPIE, 1990, 1224:2~14
- 48 潘圆圆, 崔瑞祯, 陈 刚 等. 用于半导体激光器的棱镜组光束整形方法[J]. 激光技术, 2006, 30(4):370~376
- 49 王 峰, 黄 恒. 线形光束的折射法整形器[P]. 中国发明专利, CN2499860, 2002- 07- 10
- 50 Brian Faircloth. High- brightness high- power fiber coupled diode laser system for material processing and laser pumping [C]. SPIE, 2003, 4973:34~41
- 51 牛 岗, 樊仲维, 王培峰 等. 大功率半导体激光阵列单光纤耦合技术[J]. 半导体学报, 2007, 28(10):1607~1610
- 52 严瑛白, 王 超, 邬敏贤 等. 半导体激光器的二元光学消像散准直器件[J]. 红外与激光工程, 1996, 25(5):36~42
- 53 谢 梦, 曾晓东, 安毓英. 大功率半导体激光器二元光学消像散准直器件设计[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(1):102~105
- 54 C. C. Aleksoff, K. K. Ellis, B. D. Neagle. Holographic conversion of Gaussian beam to near- field uniform beam [J]. Opt. Eng., 1991, 30:537~543
- 55 C. W. Trussell, V. King, L. R. Condiff. High brightness laser diode arrays [C]. SPIE, 1995, 2397:244~249
- 56 田克汉, 严瑛白, 谭峭峰. YG 算法设计衍射光学光束整形器件的两种改进[J]. 中国激光, 2002, 29(4):307~312
- 57 金国藩, 严瑛白, 邬敏贤. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998:1~30