

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0066-04

两种非球面微透镜大功率半导体激光器 阵列准直效果的分析

初新俊, 王智勇, 马春雨, 左铁钊

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100022)

摘要 大功率半导体激光器(HPLD)快轴发光光束具有很大的发散角,且快慢轴发散角的差别很大,限制了其在工业加工中的直接应用。从理论上推导用于大功率半导体激光器准直面型的数学模型,在准直面型的推导过程中将微透镜的放置方式考虑进去,从符合实际应用的角度推导出目前最常用的两种准直面型的一般表达式,它们分别是椭圆面型和双曲面型。使用 ZEMAX 软件对所推导的两种理论模型进行模拟分析,通过比较,讨论这两种面型在应用上的优缺点,阐述两种微透镜的应用范围。结果表明,这两种准直面型对大功率半导体激光器的准直效果远远好于常规的球面准直透镜。

关键词 激光技术; 大功率半导体激光器; 旋转二次曲面; 等光程原理; 准直; ZEMAX 软件

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A

Analysis of Two Aspheric Micro-Lens in Collimating High-Power LD

CHU Xin-jun, WANG Zhi-yong, MA Chun-yu, ZUO Tie-chuan

(College of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract There is a large divergence angle of the fast-axis output beam of high power diode laser (HPDL) and the great differences between the fast-axis and slow-axis beam limit the direction application of HPDL. The mathematical model of the LD collimation lens surface is researched and by using aplanatic principle and considering the position of microlens, two equations of two types of quadratic-vertical surfaces-elliptical surface and hyperbolic surface-are established in a practice way. These two models are simulated in ZEMAX software and the conclusion is elicited; the effect of these two collimation lens are much better than the regular spherical surfaces.

Key words laser technique; high-power LD; quadratic-vertical surface; aplanatic principle; collimation; ZEMAX software

1 引 言

大功率半导体激光器(HPLD)具有体积小、重量轻、效率高、工作寿命长及可直接调制等许多重要特点,可广泛应用于光学指示、抽运光源、材料加工、激光医疗、通信、娱乐及军事等领域,在许多方面已经取代了传统的固体和气体激光器^[1,2]。

但是由于半导体激光器的光波导存在较强的非对称性,其输出光束的空间分布在垂直于结平面方向和平行于结平面方向出现较大的差别,且具有较大的发散角,使半导体激光器的直接应用受到了许多限制。典型的大功率半导体激光器线阵的慢轴平面内的发散半角约为 10° ,而快轴平面内的发散半

角却达到 40° 。一般情况下,大功率半导体激光器的应用都需要对其快轴发光光束进行整形后才能使用。如何获得高光束质量的准直效果一直是国际研究的热点和难点。本文从理论上推导了用于大功率半导体激光器准直面型的数学模型,在准直面型的推导过程中将微透镜的放置方式考虑进去,推导出了两种准直面型的一般表达式,它们分别是椭圆面型和双曲面型。使用 ZEMAX 软件对所推导的两种理论模型进行模拟分析,通过比较,讨论了这两种面型在应用上的优缺点,阐述了两种微透镜的应用范围,得出结论:这两种准直面型对大功率半导体激光器的准直效果远远好于常规的球面准直透镜。

基金项目: 国家科技部国际合作重点项目、国家 863 计划(2002AADF3101)、国家自然科学基金(60407009)、北京市自然科学基金(4042007)和北京市科委计划(H039430010120)资助课题。

作者简介: 初新俊(1980—),男,山东济南人,北京工业大学激光工程研究院研究生,主要从事大功率半导体激光器阵列光束整形的研究。E-mail: cxj_chuchu@163.com

2 理论推导

对于半导体激光器的准直,其目的是将发散角很大的光束变为平行光束,根据光路的可逆原理,可以认为用于准直的曲面是将平行光束汇聚到理想点的曲面。这样考虑对于下面的数学建模来说既简便又准确,下面的讨论都将采用反向光路追迹的方法来进行数学建模。

半导体激光器准直透镜大都采用柱透镜形式,所以曲面可用柱透镜的截面内的曲线方程来表示^[3]。如图1,取光轴为 x 轴,设介质的折射率为 n ,空气的折射率为1。平行光入射到曲面上的点为 $P(x,y)$ 。理想状态下,这个曲面应当满足所有的平行光线都汇聚到点 F 上(理想焦点),设焦距为 f ,根据费马原理,到成像点上的所有光线的光程都相等,由此,可以得到曲面上各点应当满足的方程

$$n \cdot d + f = n \cdot x + \sqrt{(d+f-x)^2 + y^2}, \quad (1)$$

令 $c_1 = n \cdot d + f, c_2 = d + f$,则(1)式化为

$$c_1 = n \cdot x + \sqrt{(c_2 - x)^2 + y^2}. \quad (2)$$

移项并消除根号,得到方程

$$(n^2 - 1)x^2 + (2c_2 - 2c_1n)x - y^2 = c_2^2 - c_1^2. \quad (3)$$

由于使用的介质 $n > 1$,所以 x 的二次项系数大于零,可见(3)式是一个双曲线方程。进一步化简(3)式,得

$$\left(x + \frac{c_2 - c_1n}{n-1}\right)^2 - \frac{y^2}{\frac{(c_2^2 - c_1^2)(n^2 - 1) + (c_2 - c_1n)^2}{(n^2 - 1)^2}} = \quad (4)$$

令 $c = \frac{(c_2^2 - c_1^2)(n^2 - 1) + (c_2 - c_1n)^2}{(n^2 - 1)^2}$,并将原点移

动到 $\left(-\frac{c_2 - c_1n}{n-1}, 0\right)$,得到新的最简双曲线方程

$$\frac{x'^2}{c} - \frac{y'^2}{c(n^2 - 1)} = 1. \quad (5)$$

从图1可以看出,将大功率半导体激光器的发光面放置在 F 点上,理论上即可得到完全平行的出射光束。这种准直的优点是:可以将半导体激光器发光面放到距离透镜很近的地方,经过很短距离的传播后,入射到透镜表面的光束半径很小,对于将光束耦合到光纤中十分有利。这样做不仅大大缩小了透镜的通光孔径,而且将透镜制作成微透镜,减小了系统的体积,增加了系统的紧凑程度。不过,这种准直模型也有其缺点:1)弯曲的透镜表面会将一些入射光散射掉,损失一部分能量,虽然在透镜表面镀膜可以改善这个不足,但是会增加系统的成本。2)当

半导体激光器靠近透镜曲面到一定程度的时候,由于半导体激光器快轴发光面不是一条线,所以,半导体激光器发光面的尺寸相对于透镜的尺寸来说不能忽略不计,即从截面上看,不能把半导体激光器的发光面当成一个发光点,因此实际系统准直后的出射光束会因为这个原因有一定的发散角。

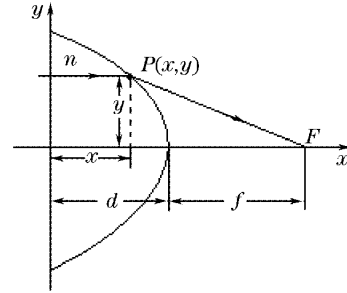


图1 双曲面截面

Fig. 1 Cut plan graph of the hyperbolic surface

为了消除上面的两种不足之处,将半导体激光器的发光面放置到凸面的后面,即产生了如图2所示的准直模型。

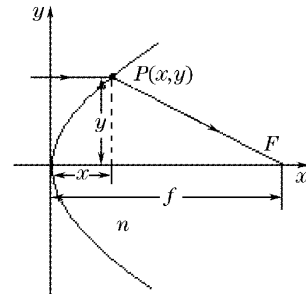


图2 椭圆面截面

Fig. 2 Cut plan of elliptical surface

这个模型是让平行光入射时先与透镜曲面有交点,焦点 F 在折射率大的一边。设透镜的折射率为 n ,空气的折射率为1,焦距设为 f ,以透镜的顶点为坐标原点,建立坐标系。应用费马原理,可以得到如下方程

$$n \cdot f = x + n \cdot \sqrt{(f-x)^2 + y^2}, \quad (6)$$

化简(6)式,得

$$(n^2 - 1)x^2 + (2nf - 2n^2f)x + n^2y^2 = 0. \quad (7)$$

对于一般的透镜介质, $n > 1$,即 $n^2 - 1 > 0$,可以看出(7)式描述的是一个椭圆方程。

令 $c = \left(\frac{nf - n^2f}{n^2 - 1}\right)^2$,并把原点移动到 $\left(-\frac{nf - n^2f}{n^2 - 1}, 0\right)$,可以得到最简的椭圆方程

$$\frac{x'^2}{c} + \frac{y'^2}{cn^2/(n^2-1)} = 1. \quad (8)$$

运用这种模型,光束传播到透镜曲面时光斑半径已经很大,基本上可以忽略半导体激光器发光面的尺寸大小,即在截面上把半导体激光器的快轴发光面作为一个点光源。但是考虑到实际情况,透镜平端面必然也会散射一部分光,损失一部分光能。

3 ZEMAX 软件模拟结果及分析

下面利用 ZEMAX 软件对双曲面准直、椭圆面准直、平凸球面柱透镜准直以及双凸球面柱透镜准直这四种模型进行建模画图分析,后两种模型也是实验室中使用的准直办法,将它们放到这里与上面两种非球面准直透镜一起讨论,作为比较。见图 3。

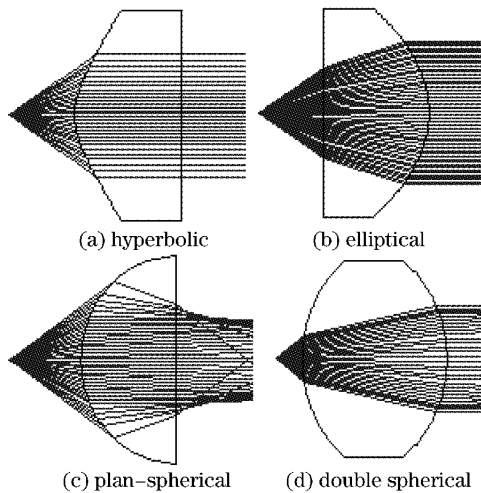


图 3 ZEMAX 软件画出的各种准直面型

Fig. 3 Four collimation system drawing by ZEMAX

通过图 3 可以看出,以上四种准直面型在短距离内的准直效果还是比较理想的,这对于半导体激光器与光纤的耦合是十分有利的。使半导体激光器的出射光尽可能多地进入光纤并在光纤内部发生全反射,显然,入射光纤的光是平行光对于半导体激光器耦合光纤来说是比较理想的。图 3 中的(a),(b)两种模型由于制造成本比较高,一般用在对耦合效率要求很高的情况下;模型(c)虽然能使光束进入光纤,但是由于部分入纤光线的发散角比较大,不能在光纤内全反射,故部分能量会在光纤包层中泄漏,耦合效率不高;对于模型(d),常用的是圆形柱透镜来将半导体激光器的光束耦合进入光纤,这种方法,成本低,操作简单,在对耦合效率要求不高的情况下是最常用的方法。

图 4 是准直光束传播 50 mm 后的光斑半径与

包含能量的关系图。可以看出,椭圆面型对于准直效果是最理想的,双曲面其次,平凸面型准直后的光束发散角比较大。

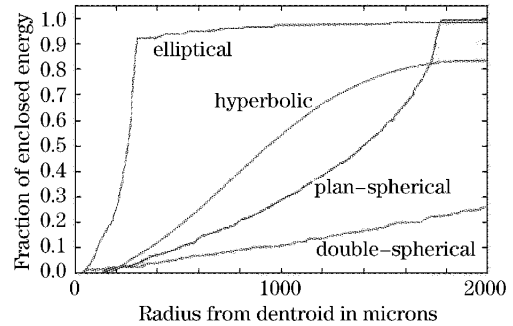


图 4 光束传播 50 mm 后的圈入能量与光斑半径的关系

Fig. 4 Geometric encircled energy of the four surface 50 mm for away from the LD face

在 ZEMAX 软件中,让光束传播得更远一些,会发现这四种面型的准直效果出现了比较明显的变化,双凸球面和平凸球面准直后的光束发散角变得很大,而两种非球面的透镜准直后的光束发散角依然很小,这充分体现了旋转二次非球面面型在大功率半导体激光器光束准直方面的优势。图 5 为光束传播 500 mm 后的光斑半径与包含能量的关系图。

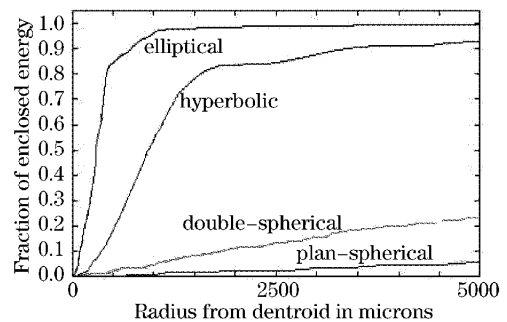


图 5 光束传播 500 mm 后的圈入能量与光斑半径的关系

Fig. 5 Geometric encircled energy of the four surface 500 mm for away from the LD face

4 结 论

通过本文的分析可以看出,在各种常见的准直面型中,不论是近距离还是远距离,椭圆面的准直效果是最好的,因此这种面型被广泛应用于大功率半导体激光器的准直,一般情况下能够将发散半角约为 40° 的快轴光束准直到发散角不到 2 mrad 的近平行光束。而用双曲面面型制造的微透镜阵列常用作大功率半导体激光器的耦合光纤,最高得到了高于 85% 的耦合效率。球面透镜由于球差的缘故准直效

果并不是很好,其使用范围越来越窄。

目前,在半导体激光器的光束准直方面,非球面面型的使用几率呈上升趋势。虽然非球面准直系统设计计算较复杂,加工检验较困难,当前工艺水平还难以达到设计质量的要求,但随着光学仪器事业的不断发展,同时由于电脑的功能日益强大,高精度自动化机床的出现,工艺不断更新,为广泛设计和应用非球面准直系统提供了极为有利的条件^[4,5]。

参 考 文 献

- 1 Bo Baoxue, Gao Xin, Wang Ling *et al.*. 808 nm wavelength high-power fiber coupling LD [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(3): 193~196
薄报学,高欣,王玲等. 808 nm 波长光纤耦合高功率半导体
- 2 Lin Bin, Zeng Xiaodong, An Yuying *et al.*. Analysis on the laser diode-multimode fiber coupling efficiency [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1200~1203
林彬,曾晓东,安毓英等. 大功率激光二极管与多模光纤耦合效率分析 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1200~1203
- 3 Chen Mei, Zheng Shiwang. Non-aberration optical surface [J]. *Henan Science*, 2005, **23**(3): 331~334
陈梅,郑世旺. 无球差的光学曲面 [J]. *河南科学*, 2005, **23**(3): 331~334
- 4 Wang Xiulin, Huang Wencai, Guo Fuyuan. Research on semiconductor laser beam collimators [J]. *J. Appl. Opt.*, 1999, **20**(1): 1~5
王秀琳,黄文财,郭福源. 半导体激光束准直系统的研究 [J]. *应用光学*, 1999, **20**(1): 1~5
- 5 Takunori Taira, Takao Kobayashi. Intracavity frequency doubling and Q switching in diode-laser-pumped Nd:YVO₄ lasers [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(21): 4298~4301
激光器 [J]. *中国激光*, 1999, **A26**(3): 193~196