

实现灵活光束转换的二元光学器件及其应用*

毛文炜 傅振海 邬敏贤 霍玉晶 金国藩

(清华大学精密仪器系 北京 100084)

提要 介绍了一种可将线阵半导体激光器的光束转换为光斑截面为矩形的准平行消像散光束的二元光学器件,并讨论说明其设计原理、加工制作方法、测试实验结果及应用。

关键词 二元光学, 光束变换, 半导体激光泵浦固体激光器

1 引 言

二元光学基于衍射理论,由光学和微电子技术相互渗透交叉而形成^[1]。它利用计算机技术优化设计微图形结构,并用大规模集成电路制造工艺中的光刻技术与微细加工技术制作出新型功能器件^[2]。二元光学器件具有传统光学器件无法比拟的优越性,尤其表现在它可以实现任意形状的波面变换,实现普通折反光学元件无法完成的功能,或是将多个折反元件的功能集于一身,因而对于促进现代光学仪器及元件的微型化、功能的集成化具有很重要的意义。目前,二元光学器件已成功地应用于将椭圆高斯光束变换为均匀圆光束,对半导体激光器的椭圆像散光束准直整圆消像散,分波长聚焦及分束等,充分体现出其灵活性的优点。本文充分利用二元光学器件的灵活光束变换功能,设计研制了一种新型器件,用于将半导体激光器阵列发出的发散且具有较大像散的复杂光束变换为矩形截面的准平行消像散光束,并以纵向泵浦固体激光器为例来说明其应用。

2 设计原理

半导体激光器效率高、体积小、功率大、谱线窄,因而在泵浦固体激光器或光纤激光器、激光加工等方面得到广泛应用,但是由于半导体激光器的出射光束发散角大,存在较大像差,同时阵列的出射光束为一线阵且截面上光强不均匀,因而其应用受到一定限制^[3,4]。我们设计了一种二元光学器件,对其出射光束进行整形^[5]。

对于纵向泵浦固体激光器来说,泵浦源的光束质量及功率是很重要的,因此,应考虑对半导体激光器的出射光束校正像差,提高光束的填充比,并尽量提高光束的变换效率及耦合效率。同时,考虑到目前二元光学器件制造工艺上的具体情况,我们采取了这样的设计方案:首先用一显微物镜对阵列进行放大,缩小出射光束的孔径角,这样可以增大后续二元器件的特征

* 国家自然科学基金资助项目。

尺寸;然后用二元器件对阵列中每个半导体激光器的出射光束准直消像散,并向不同方向偏转,得到二维的光斑分布;最后用二元器件将向不同方向偏折的光束重新偏转到系统的光轴方向。

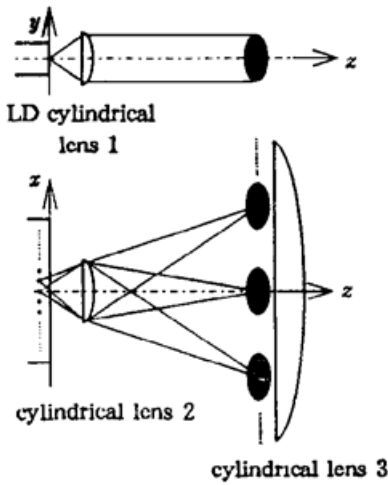


图 1 单组激光器的光束变换原理

Fig. 1 Principle of beam transformation of one group laser diode array

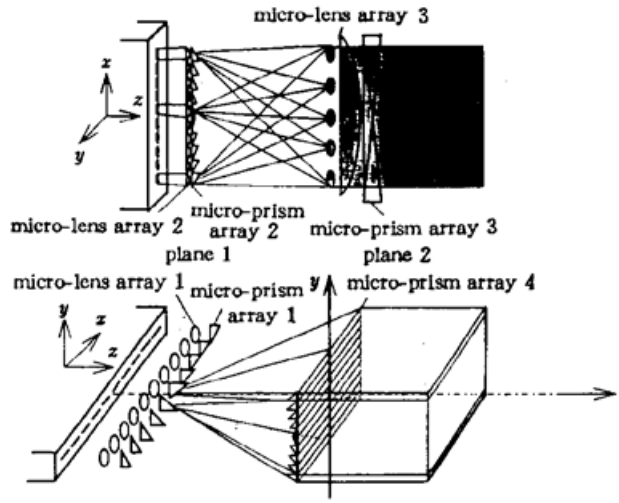


图 2 整个变换系统的设计原理

Fig. 2 Principle of beam transformation of the whole laser diode array

将 $500 \times 1 (\mu\text{m})$ 的半导体激光器阵列的 50 个激光器分成 10 组, 每组 5 个。对每组激光器, 先用显微物镜将其同时放大 10 倍, 然后采用图 1 所示的复合成像系统, 柱面镜 1(焦距 f'_1) 将 y 方向的发散光束准直, 柱面镜 2(焦距 f'_2) 将每个激光器 x 方向的光斑放大为大致与 y 方向相当。这样, 得到的光斑基本上是圆对称的。在 x 方向上, 柱面镜 3 将各个小激光光束的对称中心线校正成与系统光轴平行。经过这样的变换后, 每组激光器的出射光为准平行光, 光斑截面为矩形, 但长宽比较大。为得到近似方形的二维光场分布, 我们可以采用不同偏转角的小棱镜对各激光组出射光束的传播方向进行偏转, 系统如图 2 所示。在 x 方向上, 微棱镜阵列 2 中的每个微棱镜将每组激光器的 5 个出射光束向系统的光轴方向偏折, 在 y 方向上, 微棱镜阵列 1 中的每个微棱镜将每组激光器的 5 个出射光束向远离系统的光轴方向偏折, 微棱镜阵列 1 和微棱镜阵列 2 位于平面 1 处, 这样, 每组激光器的出射光束便由两个微棱镜向不同方向偏折。由于每个微棱镜的偏转方向及偏转角度各不相同, 因此, 在平面 2 处形成矩形的光场分布, 但此时每个激光器出射光束的传播方向各不相同, 需进行校正。微棱镜阵列 3, 4 位于平面 2 处, 阵列中每个微棱镜的偏折方向及偏折角度分别与微棱镜阵列 2, 1 中的各个微棱镜相同, 它们将各个激光束偏转回光轴方向。经过上述的光束转换后, 平面 2 后的出射光束近似平行光, 光斑截面为矩形, 而且填充比较高。

3 器件制作

毫无疑问, 上述的设计思想是不可能由传统光学工艺和器件来实现的, 因此我们考虑用二元光学方法来实现。首先由各个微元件位相函数的迭加得到每个平面处总的位相函数。平面 1 处每个单元区域(共 10 个)的位相函数为

$$\varphi_i(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} [\sqrt{(f'_1)^2 + a_{1i}^2} - \sqrt{(f'_1)^2 + y^2} + \sqrt{(f'_2)^2 + (a_{2i} - b_i)^2} - \sqrt{(f'_2)^2 + (x - b_i)^2} +$$

$$\sin\theta_{x_i}(a_{2i} - x) + \sin\theta_{y_i}(a_{1i} - y)] \quad (i = 1, 2, \dots, 8, 9, 10) \quad (1)$$

其中, (a_{2i}, a_{1i}) 为每个单元区域(偏心透镜)上离偏心透镜中心最远点的坐标, b_i 为每个单元区域中心的 x 坐标, $\theta_{x_i}, \theta_{y_i}$ 为微棱镜组 2 和 1 中对应每个单元区域的微棱镜在 x, y 方向的偏转角。上式右边中, 前两项为微透镜阵列 1 的位相函数, 第 3, 4 项为微透镜阵列 2 的位相函数, 第 5 项为微棱镜阵列 2 的位相函数, 第 6 项为微棱镜阵列 1 的位相函数。

同样, 平面 2 处每个单元区域(共 10 个)的位相函数为

$$\begin{aligned} \varphi_{2i}(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} [& \sqrt{(f'_3)^2 + a_{2i}^2} - \sqrt{(f'_3)^2 + x^2} + \sin\theta_{x_i}(a_{2i} - x) + \\ & \sin\theta_{y_i}(a_{1i} - y)] \quad (i = 1, 2, \dots, 8, 9, 10) \quad (2) \end{aligned}$$

其中, (a_{2i}, a_{1i}) 为每个单元区域(偏心柱面镜)上离偏心柱面镜中心最远点的坐标, $\theta_{x_i}, \theta_{y_i}$ 为微棱镜组 3 和 4 中对应每个单元区域的微棱镜在 x, y 方向的偏转角。

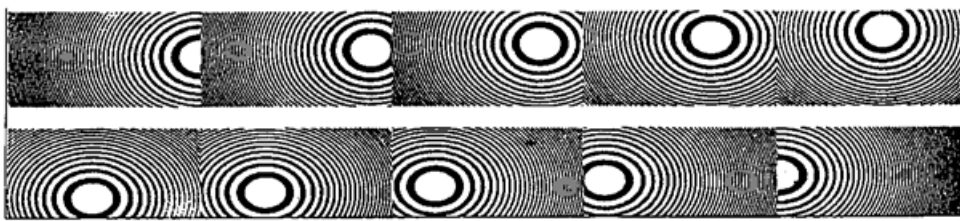


图 3 器件 1 的掩模板图

Fig. 3 Mask figure of the first element

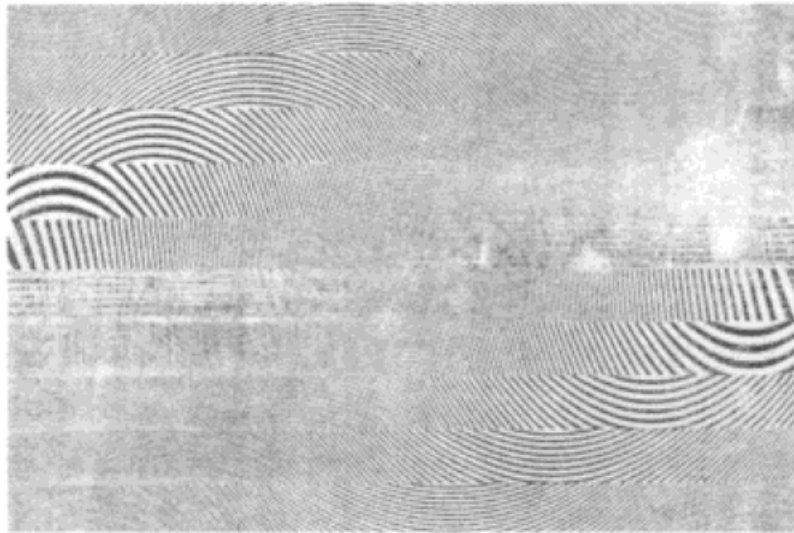


图 4 器件 2 的掩模板图

Fig. 4 Mask figure of the second element

上述位相分布中波长的整数倍部分属于无效成分, 可以去除, 得到的是 $0 \sim 2\pi$ 之间的位相分布, 再经 2^n 级分级量化后, 得到阶梯型的位相分布。将计算得到的图形写成 CIF 格式, 并分割为 PG 带, 通过图形发生器制得刻蚀用掩模板, 再用离子刻蚀工艺在光学材料基底上刻蚀出对应的阶梯面型, 即得到所需的二元器件。因为该二元器件较小, 所以可在掩模板上作出多个器件的图形, 通过一次刻蚀得到多个器件, 提高制造效率。图 3, 4 所示分别为器件 1, 2 的掩模图形。由于工艺条件的限制, 此器件制作时的量化等级为 4 阶, 器件 1 的实际大小为 $5 \times$

0.24 (mm), 器件 2 的实际大小为 3.6×2.4 (mm)。

4 器件测试

将器件 1 单独置于平行光路中, 在其后的不同平面处得到水平焦斑和竖直焦斑, 分别如图 5(a), (b) 所示, 可见器件确实可以起到补偿像散及偏转成像的作用。设计中 $f'_1 = 2.0$ mm, $f'_2 = 3.556$ mm, 设计波长为 $0.809 \mu\text{m}$, 由于加工工艺及实际使用波长等方面的原因, 实测波长与设计波长有较大的差别。在 $0.633 \mu\text{m}$ 波长下, 实测的 f'_1, f'_2 分别为 2.6 mm, 4.7 mm。

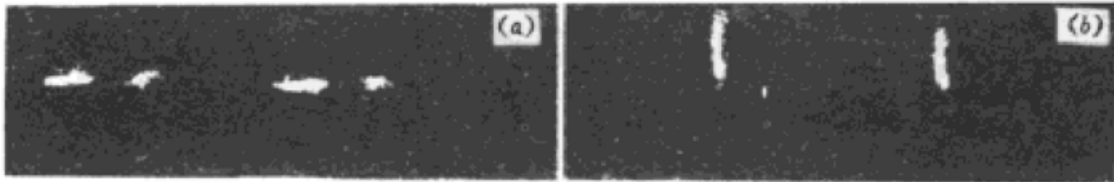


图 5 器件 1 的水平焦斑 (a) 和器件 1 的竖直焦斑(b)

Fig. 5 Longitudinal focal spot of the first element (a) and vertical focal spot of the first element (b)

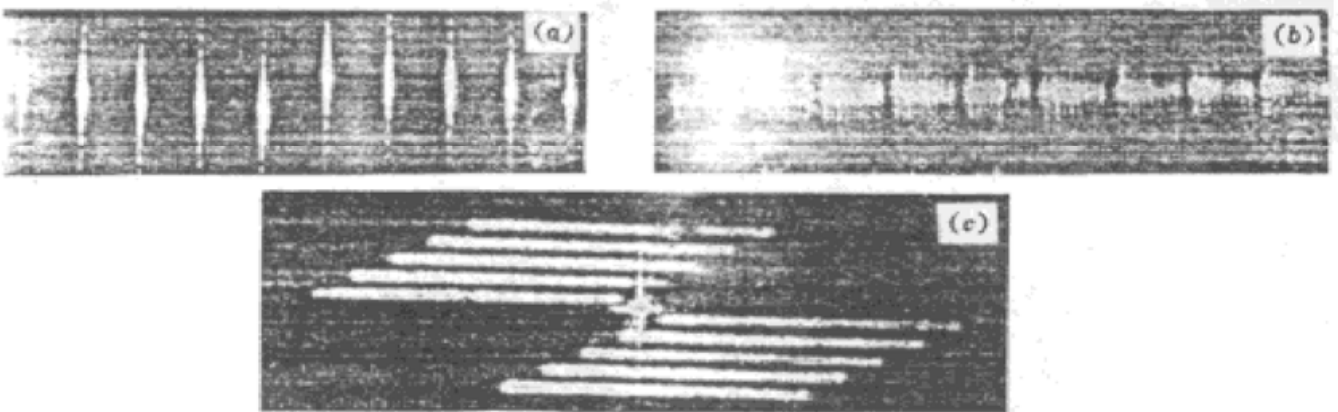


图 6 (a) 器件 2 后焦面处的光场分布; (b) 器件 2 焦面后平面 1 处的光场分布; (c) 平面 1 后的平面 2 处的光场分布

Fig. 6 (a) Optical field distribution on the focal plane of the second element; (b) Optical field distribution on the plane 1 behind the focal plane of the second element; (c) Optical field distribution on the plane 2 behind the plane 1

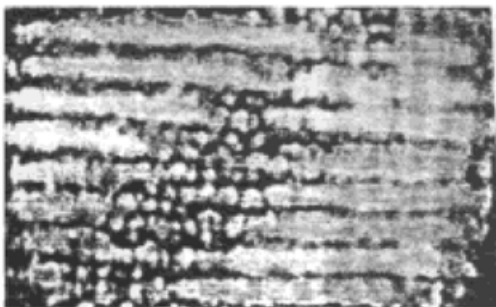


图 7 半导体激光器阵列出射光束的变换结果

Fig. 7 Transformation result of the beam emitted from the laser diode array

将器件 2 单独置于平行光路中, 在其后的不同平面处得到出射光场分布, 分别如图 6(a), (b) 所示。其中, 图 6(a) 为其后焦面处的光场分布, 图 6(b) 为焦面后位置 1 处的光场分布, 图 6(c) 为焦面后位置 1 后的位置 2 处的光场分布。可以看出它将一束平行光分成 10 束向不同方向传播的光。设计中 $f'_3 = 28.444$ mm。

半导体激光器阵列的出射光束经器件变换后的结果如图 7 所示, 与设计预期结果相符。但是由于实际器件只有 4 个位相阶, 而且线宽较小, 加工误差较大, 所以每个实际器件的衍射效

率都在 50% 左右。

5 器件的应用及结论

图 8 为此器件用作半导体激光器泵浦 LNYAB 激光器的耦合系统的光路图^[6,7]。LD 阵列发出的光束被显微物镜会聚, 再经过两个器件, 变成准平行光束, 由模式匹配透镜 5 聚焦并耦合进激光晶体中。激光晶体的前一面镀有对 $0.809\ \mu\text{m}$ 增透、对 $1.062\ \mu\text{m}$ 和 $0.531\ \mu\text{m}$ 增反的膜层, 后一面上镀有对 $0.809\ \mu\text{m}$ 和 $1.062\ \mu\text{m}$ 增反、对 $0.531\ \mu\text{m}$ 增透的膜层, 输出腔镜上镀有对 $0.531\ \mu\text{m}$ 高透的膜层。LNYAB 晶体本身具有自倍频功能, 它被泵浦产生 $1.062\ \mu\text{m}$ 的激光, 经自身倍频后产生以基模输出的 $0.531\ \mu\text{m}$ 的绿光。

此器件的设计方法简便易行, 既可以很容易地将需要多个折反光学元件才能实现的功能集成于一个二元光学器件上, 又可以完成传统光学器件无法完成的功能, 既适合于多种新型光学器件的设计, 又可以简化很多现有的光学系统, 比如任意形式的光互连网络、任意形式的光学混洗、多光路并行光学处理系统及多光束测量系统等, 因此, 对于促进现代光学仪器及元器件的微型化、功能的集成化具有很重要的意义。另外, 这种设计方法不需要在位相屏(器件所在面)和出射面间进行各种优化迭代计算, 因而避免了大量的数值计算和迭代及其带来的收敛性问题, 使得设计过程更加简单。从理论上讲, 凡是可以由传统光学器件实现的系统均可由二元光学器件来实现, 因为传统光学器件的位相函数一般都可用较简单的函数来表达, 只需将各个传统光学器件的位相合成, 并去除无效位相, 再分级量化加工即可制成相应的二元光学器件。目前, 用多次套刻技术制作的二元光学器件的衍射效率可以做到 80% 以上, 具有实用意义, 因此上述的方法也是比较切实可行的。当然, 由于目前微细加工的水平所限, 大数值孔径高衍射效率的二元光学器件还较难实现, 这在一定程度上限制了二元光学器件的应用。另外, 就本文的器件而言, 若能将两个器件制作在同一片基底的两个相对面上, 则可以减小装调及对准的困难, 使其使用更加方便。

致谢 器件制作中得到了清华大学微电子所申明、吴江梅老师、中国科学院微电子中心李友工程师、北京大学介观物理国家重点实验室的崔晓明、陈茗玲老师的帮助, 在此一并向他们表示感谢。

参 考 文 献

- 1 J. R. Leger, M. Hotz, G. J. Swanson *et al.*. Coherent laser beam addition: An application of binary optics technology. *The Lincoln Labs Journal*, 1988, 1(2) : 225~ 245
- 2 J. R. Leger, W. C. Goltsov. Geometrical transformation of linear diode laser arrays for longitudinal pumping of solid-state lasers. *IEEE J. of Quant. Electr.*, 1992, QE-28(4) : 1088~ 1100
- 3 Josef Berger, D. F. Welch, D. R. Scifres *et al.*. High power, high efficient Nd:YAG laser end pumped

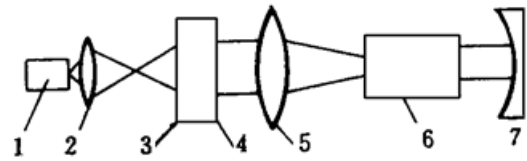


图 8 器件用于半导体激光器泵浦固体激光器的光路图

1: LD 阵列; 2: 显微物镜; 3: 器件 1; 4: 器件 2; 5: 模式匹配透镜; 6: 激光晶体; 7: 输出腔镜

Fig. 8 Optical system of a LDA pumped solid-state laser using BOEs

1: LD array; 2: objective; 3: BOE 1; 4: BOE 2; 5: mode matched lens; 6: crystal; 7: output cavity mirror

by a laser diode array. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **56**(16) : 1212~ 1214

- 4 T. Y. Fan, Antonio Sanchez. Pump source requirements for end-pumped lasers. *IEEE J. of Quant. Electr.*, 1990, **QE-26**(2) : 311~ 316
- 5 傅振海, 邬敏贤, 崔晓明 等. 半导体激光器泵浦固体激光器中的二元光学器件. *仪器仪表学报*, 1996, **17**(2) : 382~ 383
- 6 霍玉晶, 张沁馨, 吴红兵 等. 泵浦紧耦合自倍频激光器. *激光与红外*, 1993, **23**(5) : 33

Binary Optical Elements Used for Agile Beam Transformation and Their Application

Mao Wenwei Fu Zhenhai Wu Minxian Huo Yujing Jin Guofan
(*Tsinghua University, Beijing 100084*)

Abstract A novel binary optical element (BOE) used to transform the astigmatic and divergent beam emitted from a laser diode array (LDA) into an astigmatism-free and quasi-collimated beam which has a rectangular cross-section is introduced. The theory of design, fabrication methods, testing and experimental results and application of this BOE are discussed.

Key words binary optics, beam transformation, laser diode array pumping solid-state laser