

文章编号: 1001-3806(2006)04-0381-04

## 用二元位相光栅进行激光束叠加的研究

罗铂靛<sup>1</sup>, 王成程<sup>2</sup>, 杜惊雷<sup>1\*</sup>, 马 驰<sup>2</sup>

(1. 四川大学 物理学院, 成都 610064; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

**摘要:** 基于标量衍射理论, 系统探讨了二元位相光栅实现激光束叠加的理论和位相光栅设计方法, 利用新型遗传模拟退火混合算法得到优化的光栅参数, 给出其用于分束和耦合时的模拟结果, 并讨论实际误差对位相光栅耦合效率的影响。二元位相光栅用于激光束叠加有结构简单, 调节灵活的优点, 可以有效地提高激光束的功率密度和系统的整体性能。

**关键词:** 光学设计与制造; 光束叠加; 二元位相光栅; 遗传模拟退火算法; 误差分析

**中图分类号:** O436.1      **文献标识码:** A

## Study on laser beam combination by binary phase grating

LUO Bo-liang<sup>1</sup>, WANG Cheng-cheng<sup>2</sup>, DU Jing-lei<sup>1</sup>, MA Chi<sup>2</sup>

(1. Department of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 2. Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract** From the point of view of Fourier optics, laser beam coherent combination by binary phase grating is discussed and the design method of phase grating is studied. Using the genetic simulated annealing algorithm, the optimum parameters of grating are obtained. Then, the simulation results of diffraction and combination are presented. The error analysis shows that it will influence the diffraction efficiency. For laser beam combination, binary phase grating is simple, flexible and can greatly improve the laser beam's power density and the system integration.

**Key words** optical design and fabrication; beam combination; binary phase grating; genetic simulated annealing algorithm; error analysis

### 引 言

由于激光器自身内部物理因素以及结构的限制, 提高单个激光器输出功率十分困难。将多个激光器的输出光耦合叠加起来, 无疑会是一种可以提高激光输出功率的有效方法<sup>[1]</sup>, 但采用传统的光学元件或复杂的微光学结构实现束叠加, 会因加工和实验装调复杂等难以应用。二元衍射光学元件具有衍射效率较高、结构简单、体积小、加工制作容易、调节方便和可以大量复制等特点, 使得该项技术成为一种耦合的理想手段<sup>[2]</sup>。

目前, 激光光束合成技术已受到国外科技人员广泛关注, 但其报道多为用一维结构位相光栅进行并束的研究<sup>[3-5]</sup>, 而国内则鲜有深入的研究报道。能否很好地实现光束相干合成是有具体的条件限制的<sup>[6]</sup>。本文中根据 ICF 系统中应用微光学元件的技术指标<sup>[7]</sup> (要求用大结构尺寸、高加工精度的微光学元件, 且须稳定性好、调节方便), 利用遗传模拟退火混合优化算

法, 设计光束叠加所需二维位相光栅, 并分析加工和装调误差对耦合效率的影响, 为开展光束相干叠加实验研究提供指导性依据。

### 1 二元位相光栅实现光束相干叠加的设计理论

#### 1.1 光束叠加的原理

用二元位相光栅叠加相干光束的思想如下<sup>[3]</sup>: 既然达曼型位相光栅可将轴向入射的平面波在远场分成多个近似等光强沿不同方向传播的光束, 反之, 多个等光强的可相干光波按一定角度和位相入射到该光栅上, 则其出射光能量也将主要集中在轴向, 即相干光束叠加 (见图 1)。这种方法的理论简单明了, 实践上有一定可操作性, 若能设计并加工出合格的位相光栅即

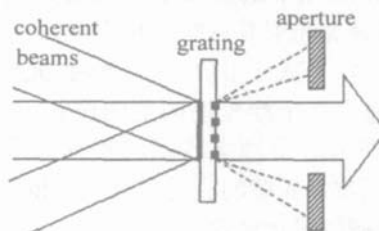


Fig 1 Multi-beam coherent on phase grating

作者简介: 罗铂靛 (1980-), 男, 硕士研究生, 主要从事信息光学和微光学方向的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: dujinglei@tom.com

收稿日期: 2005-06-29; 收到修改稿日期: 2005-09-02

可实现光束的相干叠加。

## 1.2 相干光束耦合的数学模型

设二维光栅的复透射率为:

$$t(x, y) = a(x, y) \exp[i\phi(x, y)] \quad (1)$$

式中,  $a(x, y)$ 和  $\phi(x, y)$ 分别是透射率函数的振幅与位相, 可用  $n$ 个平面波之和表示(1)式, 这些平面波对应该光栅的各衍射级次, 则:

$$t(x, y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} A(m, n) \exp[i\phi(m, n)] \times \exp[i2\pi(m\alpha x + n\beta y)] \quad (2)$$

式中,  $A(m, n)$ 和  $\phi(m, n)$ 为第  $(m, n)$ 级衍射光的振幅与位相  $\alpha$ 和  $\beta$ 分别正比于衍射光传播方向与  $x$ 和  $y$ 轴的夹角之余弦。当单位强度的同轴平面波垂直照射光栅时, 得到各衍射级的振幅为  $A(m, n) \exp[i\phi(m,$

$$I_{out} = \frac{1}{s} \left| \iint (x, y) t(x, y) dx dy \right|^2 \frac{1}{s} \times$$

$$\left| \iint \sum_{m'=-\infty}^{\infty} \sum_{n'=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N A(m, n) B(m', n') \exp[i\phi(m, n)] \exp[i\theta(m', n')] \exp\{i2\pi[(m+m')\alpha x + (n+n')\beta y]\} dx dy \right|^2 \quad (6)$$

式中, 积分区域  $s$ 为单个光栅周期, 仅当  $m' = -m; n' = -n$ 时:  $I_{out} \neq 0$ 。

$$I_{out} = \left| \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N A(m, n) \cdot B(-m, -n) \exp[i\phi(m, n)] \exp[i\theta(-m, -n)] \right|^2 s \quad (7)$$

$$I_{in} = \iint |E(x, y)|^2 dx dy = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N B^2(m, n) s \quad (8)$$

$$\eta = \left| \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N A(m, n) \cdot B(-m, -n) \exp[i\phi(m, n)] \exp[i\theta(-m, -n)] \right|^2 \left/ \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N B^2(m, n) s \right. \quad (9)$$

根据耦合理论, 各激光器的振幅与位相应复共轭于衍射光栅的平面波谱, 则:

$$B(-m, -n) \exp[i\theta(-m, -n)] = A(m, n) \exp[-i\phi(m, n)] \quad (10)$$

将(10)式代入(9)式:

$$\eta = \left| \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N A^2(m, n) \right|^2 \left/ \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N A^2(m, n) \right. = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N A^2(m, n) = \xi \quad (11)$$

(11)式的结果表明, 光栅的耦合效率  $\eta$ 等于该光栅分束时的衍射效率  $\xi$ 。即: 若优化设计出可实现分束的高衍射效率的位相光栅, 则该位相光栅在相干并束实验中可以获得高光束耦合效率。为提高光束耦合效率, 需保持各叠加光束有良好的相干性, 且它们在光栅表面形成的干涉光强分布较均匀, 此时, 光栅的一个作用是消除光栅表面干涉光场的空间位相分布差异, 使出射光束能成一沿轴向传播的平面波<sup>[8]</sup>。这可作为相干束合成位相光栅的优化设计一个依据。

## 1.3 位相光栅的设计理论

考虑光栅的一个周期结构, 显然, 光栅特性由其结构中的突变点坐标  $\{a_l, b_l\}$  ( $l = 1, \dots, L$ )所决定。即光

$n$ )。此光栅将一束光分成  $(2M + 1) \times (2N + 1)$ 束光的衍射效率:

$$\xi = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N A^2(m, n) \quad (3)$$

若将该光栅用于光束叠加, 将  $(2M + 1) \times (2N + 1)$ 束相干激光束以原衍射光方向照射光栅, 则光栅面上的干涉图样为:

$$E(x, y) = b(x, y) \exp[i\theta(x, y)] = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N B(m, n) \times \exp[i\theta(m, n)] \exp[i2\pi(m\alpha x + n\beta y)] \quad (4)$$

式中,  $B(m, n)$ 和  $\theta(m, n)$ 分别是第  $(m, n)$ 级入射光的振幅与位相。光栅的耦合效率:

$$\eta = I_{out}/I_{in} \quad (5)$$

式中,  $I_{in}$ 为各入射光强度之和,  $I_{out}$ 为光栅中心零级输出耦合光强度:

栅结构的优化设计实质上是要寻找一组突变点坐标集  $\{a_l, b_l\}$ , 使其满足衍射谱  $n$ 在  $-N$ 到  $N$ 级次内, 即  $2N + 1$ 个光束的光强均匀分布, 且总的衍射效率  $D_e$ 足够的高, 即:

$$D_e = D(0) + 2 \sum_{m=1}^M D(n),$$

$$D(0) = D(\pm 1) = \dots = D(\pm n) \quad (16)$$

由以上讨论可以定义误差函数为:

$$E^2 = \alpha \{ [D(0) - D_e \hat{D}(0)]^2 + 2 \sum_{n=1}^N [D(n) - D_e \hat{D}(n)]^2 \} + (1 - \alpha) (1 - D_e)^2 \quad (17)$$

式中,  $\hat{D}(n)$ 是各级强度分布的理论目标值; 第 1项衡量设计值  $D(n)$ 与目标值的差异, 第 2项则衡量衍射效率。假设  $\alpha$ 值在  $[0, 1]$ 之间变化, 则误差函数表达式中两项所占的权重大小随  $\alpha$ 变化而不同, 设计时根据对光束的均匀性及衍射效率要求选取一定的  $\alpha$ 值。

## 2 二元位相光栅实现光束相干叠加的模拟

### 2.1 位相光栅的设计和分束效果模拟

上述分析得到了二元位相光栅设计的误差函数和约束条件, 可采用遗传算法或模拟退火算法来寻找光

栅突变点坐标。采用一种遗传算法和模拟退火算法相结合的全局搜索新算法,此算法比其它算法有更高的收敛速度,并能迅速跳出局部极小。

设计中入射光为相干平面波,光波长为 351nm,入射方向垂直于光栅表面,初位相为 0。光栅材料的介质折射率为 1.4715。图 2 中给出了分束比为 2×2 的二元位相光栅分束模拟结果。其光栅衍射效率为 0.6765,光强的不均匀度为 0.02%。由上面结果可以看出,采用遗传模拟退火算法可以获得较佳的光栅参数,可有效地提高光栅的衍射效率和光束均匀度。

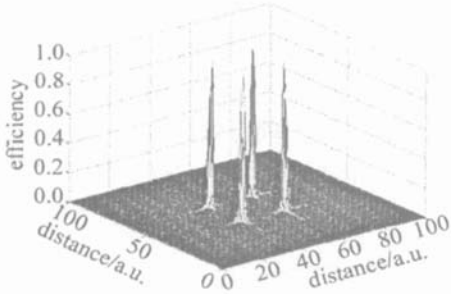


Fig 2 Simulation effects of binary phase grating for splitting beam

### 2.2 束叠加耦合效率计算

在将开展的激光并束实验研究中,拟采用 2×2 束振幅为 A 的相干平行光以一定倾斜角度 φ 照射到上述位相光栅上,其初位相与分束时的一致,在光栅表面形成的干涉图样如图 3a 所示。为使束叠加后的输出光束有最大耦合效率,可将位相光栅设计成有相同周期和位相分布结构,见图 3b。通过对相干光场位相的调整,有效抑制非零级光占总能量的比例,以提高光束合成的耦合效率。计算表明,2×2 束光相干叠加的耦合效率为 0.6752,见图 3c,与该光栅分束时的衍射效率一致。

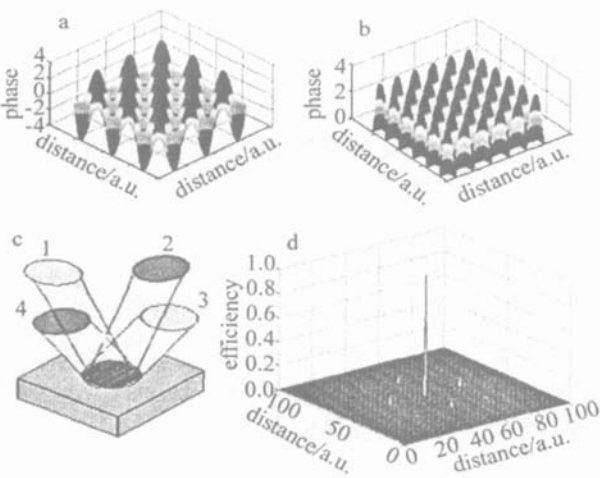


Fig 3 Combination simulation of 2×2 beam s array

a— interference field of incident plane on 2×2 couple grating b— ir-  
terference field of exit facet on 2×2 couple grating c— incident beam  
array d— far field distribution graphics of combination beam

采用几何光学法、镀膜法、特殊晶体等方法也可实

现光束叠加,但其光路复杂,能量损耗严重,耦合效率一般不超过 0.5,一般二维达曼光栅的理论耦合效率也只有 0.6。而采用新算法设计的二维位相光栅不仅结构简单易于加工,也有较高的相干束叠加耦合效率,因此,在束叠加实验中优先考虑应用。

### 3 各种误差对耦合效率的影响

#### 3.1 光栅制作误差对耦合效率的影响

二元光学元件加工过程中会产生多种误差<sup>[7,9]</sup>,并对微光学元件的性能产生影响,对此进行必要的分析,为束叠加元件的加工和束叠加实验的开展提供理论依据。

3.1.1 突变点坐标不准确引起的横向误差 设位相光栅准确的突变点为  $(a_1, b_1, \dots, a_N, b_N)$ ,制作精度误差导致各突变点为  $(a_1 + d_{x_1}, b_1, \dots, a_N + d_{x_N}, b_N)$ ,则由横向位置误差所引起的强度变化可表示为:

$$dI_N = d(I(n)I^*(n)) = I(n)dI^*(n) + I^*(n)dI(n) \tag{18}$$

式中,  $dI(n) = (-i2n\pi) \sin \frac{\theta}{2} \sum_{k=1}^n (-1)^k A(n) \exp(-i2n\pi x_k) dx_k$ 。I(n)为第 n 个衍射级次的光强强度, dI(n)为第 n 个衍射级次的光强强度的变化。由上式可以看出, dI(n)与衍射级次 n 有关,即由横向位置误差引起的强度起伏随 n 变化。分析一维位相光栅横向误差对双光束相干叠加耦合效率的影响,可以发现其导致远场光强分布零级光占总能量的比例下降,并引起零级光周围旁瓣的数量和幅值的增加。图 4 中给出了二元位相光栅的占宽比与双光束相干叠加耦合效率

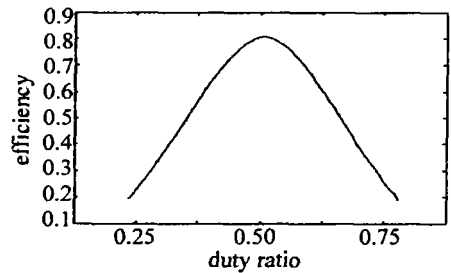


Fig 4 Relation between duty and double beams combination efficiency  
的关系,可以看出,横向加工误差会导致位相光栅占宽比失配,并严重降低双光束相干叠加的耦合效率。

3.1.2 刻蚀深度的不准确引起的纵向误差 实验中,光栅的位相误差主要是由于制作过程中刻蚀深度的不准确而引起的,它对各衍射级次的强度的影响可由各级次强度对 θ 的微分求得:

$$dI_k = \frac{1}{(2n\pi)^2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} d\theta \times$$

$$\left| \sum_{k=1}^k (-1)^k \exp(-i2n\pi x_k) \right|^2 \quad (19)$$

化简为:  $dI_k = \frac{1}{2} I_k \cot \frac{\theta}{2} d\theta$  当  $\theta = \pi$  时,  $\cot \frac{\theta}{2} = 0$  这时光栅对位相变化最不敏感, 因此, 在设计二元位相光栅时, 使其位相差为  $\pi$ , 可以增大光栅制作深度控制的宽容度。图 5 为位相光栅加工深度误差对束叠加耦合效

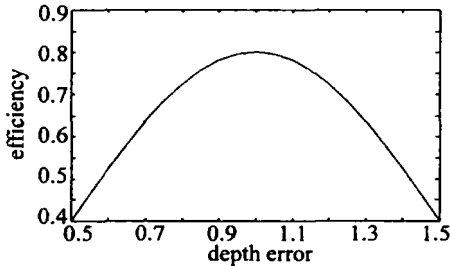


Fig 5 Influence of combination efficiency with depth

率的影响的关系曲线。与横向误差相比, 纵向误差对耦合效率的影响相对小些, 即叠加光束在远场光强分布主要由位相光栅横向结构决定。

### 3.2 耦合光束相对位相变化对耦合效率的影响

在实际实验中, 很难使耦合光束的入射角度和位相与分束时的保持一致。在图 3c 中, 光束 1, 3 的位相为  $\alpha$ , 光束 2, 4 的位相为  $\beta$ , 由图 6 可以看出, 耦合效率

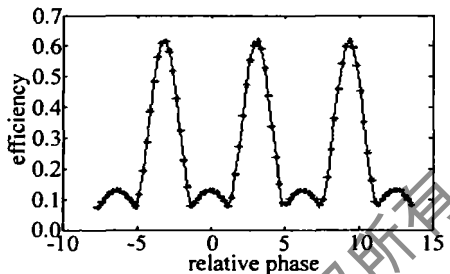


Fig 6 Combination efficiency varies with the incident beam's relative phase

$\eta$  随入射波相对相位变化 ( $\alpha - \beta$ ) 呈现出一种周期性, 并且, 在  $\alpha - \beta = 2k\pi + \pi$  时,  $\eta$  取得极大值; 而当  $\alpha - \beta \approx 2k\pi + \frac{6}{5}\pi$  时,  $\eta$  有极小值。分析表明, 相干并束过程中入射光束间位相关系对耦合效率的影响很大, 不同的  $\alpha$  值,  $\eta$  值最大所对应的  $\beta$  值是不同的, 并且仅当  $\alpha, \beta$  相差  $2k\pi$  时  $\eta$  达到峰值。

### 3.3 非等强耦合光束相对振幅变化对耦合效率的影响

通常, 实验中要保证参与叠加的激光器有良好的稳定性较难, 因此, 有必要讨论非等光强的入射情况位相光栅的耦合效率。

(1) 设光栅可实现均匀分束, 而若某一束入射光光强与其它入射光光强的比用  $\gamma^2$  表示。计算可以得到耦合效率和分束效率的比随  $\gamma$  的变化情况, 如图 7 所示。当  $\gamma = 1$  时, 即分束均匀时, 光栅的耦合效率也最高。而当  $\gamma < 1$  时, 随着  $\gamma$  偏离 1 越远, 耦合效率

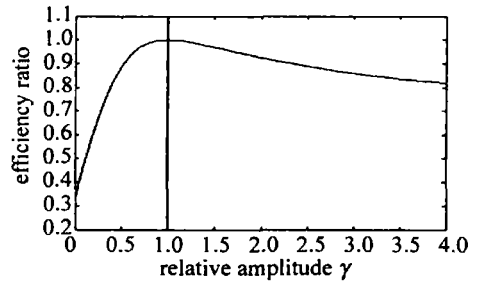


Fig 7 Influence of the relative amplitude of spotted beam to the combination efficiency

急剧下降并趋于 1/3 此时光栅无法实现并束功能; 而当  $\gamma > 1$  时, 耦合效率的降低则比较平缓。

(2) 若相干并束的各束入射光强度有随机起伏, 设波动因子  $\delta = (\text{随机光强值} - \text{理想光强值}) / \text{理想光强值}$ , 作者计算了相干耦合效率随波动因子  $\delta$  变化情况。图 8 表明, 光强随机波动的幅度越大, 耦合效率越

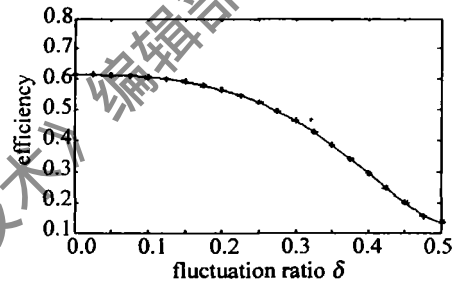


Fig 8 Ratio of summation efficiency vs splitting efficiency under varied relative strength of incident beam

低。当  $\delta < 0.25$  时, 耦合效率下降较缓,  $\delta = 0.25$  时, 耦合效率下降到 0.524; 当光强随机波动增大到 0.5 时, 耦合效率下降到 0.1057。模拟计算发现, 波动因子小于 0.15 时, 对耦合效率没有太大影响, 因此, 将入射光强的波动控制在 0.15 以内, 应能获得较好的光束叠加结果。

## 4 结束语

探索衍射光学技术实现激光束相干叠加的方法、理论模型和微结构设计方法, 对发展实用化的强激光相干合成技术和高功率激光器研究有重要意义。研究了利用二元光学技术进行激光束叠加的可行性, 数值模拟和误差分析表明, 二元位相光栅能较好实现二维光束相干叠加, 且稳定性较好, 有助于提高激光束功率密度和光束质量。为获得更高的光束相干叠加效率, 作者将进一步整体优化二维位相光栅结构, 为开展光束相干叠加实验研究提供依据。

### 参 考 文 献

[ 1 ] DU X W. High energy laser and the problems of applied optics [ J ]. Engineering Science, 2001, 3(2): 21~ 24( in Chinese ).  
 [ 2 ] JIN G F, YAN Y B, WU M X. Binary optics [ M ]. Beijing National Defence Industry Press, 1998. 55~ 63( in Chinese ).

有文献报道<sup>[8]</sup>, 质子交换波导层中,  $\text{H}^+$  在  $\text{LNbO}_3$  晶体中占位有两种情况: 一是  $\text{H}^+$  取代  $\text{Li}^+$  的位置, 成为替代原子; 二是填充在空隙中, 称为填充原子。二者分别以自由 OH 基团和氢键 OH 基团形式存在于  $\text{LNbO}_3$  波导层中。两种形式的 OH 基团的红外吸收谱特征不同, 自由 OH 基团的吸收峰位于  $3505\text{cm}^{-1}$  附近, 为一个锐利的吸收峰, 氢键 OH 基团的吸收峰位于  $3250\text{cm}^{-1}$  附近, 为一个宽带吸收峰。

从红外吸收谱的比较结果 (位于  $3250\text{cm}^{-1}$  附近宽带吸收峰逐渐减弱, 而位于  $3505\text{cm}^{-1}$  附近锐利的吸收峰略为减弱) 结合前述退火波导的 XRD 分析结果 (波导从退火前的多相并存, 经历退火而达到  $\alpha$  相) 可以推断出: (1) 自由 OH 基团对应于替代原子, 氢键 OH 基团对应于填充原子; (2)  $\alpha$  相波导的微观结构是以  $\text{H}^+$  取代  $\text{Li}^+$  的位置, 成为替代原子而以自由 OH 基团形式存在的。这样的  $\text{H}^+$  位于  $\text{LNbO}_3$  晶胞的一个氧三角平面中, 较以氢键 OH 基团形式存在于空隙中的  $\text{H}^+$  稳定, 所以经历退火后仍然存在, 而氢键 OH 基团被反应掉了。

$\text{H}^+$  半径较  $\text{Li}^+$  小,  $\alpha$  相波导的晶胞会变形, 引起折射率变化, 但引起的晶格扭曲较小, 引起的折射率变化量也小, 故退火波导表面变小而趋于稳定。这一点在前面的 XRD 分析中得到印证。因  $\alpha$  相波导的晶胞变形小, 引起的应力也小, 故退火后裂纹的程度会改善。

## 4 结 论

质子交换波导层中多晶相并存, 各晶相晶格常数

差异较大造成应力, 应力顺着主解理面释放, 产生裂纹。波导表面裂纹将会严重影响波导的质量。散射损耗是波导损耗的主要部分之一, 波导内的缺陷和波导表面粗糙是引起的散射损耗主要因素。波导表面裂纹在波导层产生空气隙, 波导光在气隙界面散射导致散射损耗增加。裂纹越深, 散射损耗越大, 严重时甚至会阻断导光通路。了解裂纹产生机理后可以指导改进工艺, 使交换过程中波导直接达到  $\alpha$  相, 减少裂纹产生, 有助于提高波导质量。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] ZHANG D L, DING G L, GAI Y M *et al*. Proton-exchanged optical waveguide [ J ]. Progress in Physics 2001, 21(1): 45~ 65( in Chinese).
- [ 2 ] JACKEL J L. Proton exchange past present and future [ J ]. SPIE 1991, 1583: 54~ 63
- [ 3 ] YIN Y J. The handbook of chemistry used in college [ M ]. Jí nan: Shandong Science and Technology Press 1985. 1092( in Chinese).
- [ 4 ] YIN Y J. The handbook of chemistry used in college [ M ]. Jí nan: Shandong Science and Technology Press 1985. 1093( in Chinese).
- [ 5 ] WEBER S, GAYLORD T K. Summary of physical and crystal structure [ J ]. Appl Phys 1985, 36(4): 191~ 203.
- [ 6 ] LI SH T. The elements of crystal XRD [ M ]. Beijing: Metallurgical Industry Press 1990. 19~ 32( in Chinese).
- [ 7 ] LI J Z. Crystal optics [ M ]. Beijing: Beijing University of Technology Press 1989. 21~ 23( in Chinese).
- [ 8 ] LONIA, HAY G, de la RUE R M *et al*. Proton-exchanged  $\text{LNbO}_3$  waveguides: the effects of post exchange annealing and buffered melts as determined by infrared spectroscopy, optical waveguide measurements and hydrogen isotopic exchange reactions [ J ]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1989, 7( 6): 911~ 919
- [ 3 ] LEGER JR, SWANSON G J, VELDKAM P W B. Coherent laser addition using binary phase gratings [ J ]. Appl Opt 1987, 26(20): 4391~ 4399
- [ 4 ] VELDKAM P W B, LEGER JR, SWANSON G J. Coherent summation of laser beams using binary phase gratings [ J ]. Opt Lett 1986, 11(5): 303~ 305.
- [ 5 ] HARRISON J, RINES G A, MOULTON P F. Coherent summation of injection locked diode-pumped Nd:YAG ring lasers [ J ]. Opt Lett 1988, 13(2): 111~ 113.
- [ 6 ] ZHANG P, GAO L J, WU Zh A. Study on the coherent composition of multiple laser beams [ J ]. Journal of Huazhong University of Science & Technology, 1997, 25(2): 66~ 69( in Chinese).
- [ 7 ] GAO FH, CAI HT, SU JQ. Study on tolerance of fabrication errors for color separation gratings applied in CF [ J ]. High Power Laser and Particle Beams 2000, 12(6): 719~ 722( in Chinese).
- [ 8 ] LU J Y, SHEN Z Ch, DONG Y H. Theoretical study on laser beams coherent combination [ J ]. Laser Technology, 2002, 26( 4): 297~ 299( in Chinese).
- [ 9 ] HERZOGH P. Microoptics elements systems and applications [ M ]. London: Taylor & Francis Ltd, 1997. 339~ 375

(上接第 384 页)