

文章编号: 1001- 2486(2010) 02- 0157- 06

基于体布拉格光栅的波束合成技术研究及实现*

刘 莉^{1,2}, 谭吉春³, 郑光威¹, 何焰蓝³, 郑浩斌³, 阮毅¹, 刘一星³(1. 国防科技大学 光电学院, 湖南 长沙 410073; 2. 长沙学院 电子与通信工程系, 湖南 长沙 410003;
3. 国防科技大学 理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 探讨实现激光波束合成的新方法, 分析体布拉格光栅作为激光波束引导器的可行性, 基于 Kogelnik 耦合波理论, 着重讨论了影响体布拉格光栅衍射效率的波长选择性和角度选择性因素。实验上给出布拉格光栅的具体制作过程, 利用透射式体布拉格光栅完成了 2 束不同波长的激光并束、2 束同种波长的激光并束实验, 验证了利用布拉格光栅进行并束的可行性。为了实际中应用的方便, 提出在晶体内部利用 90° 配置设计特定角度的布拉格光栅, 让激光垂直照射晶体表面, 即可满足布拉格角度入射, 改良并束光路, 简化理论计算, 提高并束效率。

关键词: 布拉格衍射; 体积光栅; 波束合成; 衍射效率; 角度选择性; 波长选择性

中图分类号: O438.1 文献标识码: A

Research and Implementation of Volume Bragg Gratings for Beam Combination

LIU Li^{1,2}, TAN Ji-chun³, ZHENG Guang-wei¹, HE Yan-lan³, ZHENG Hao-bin³, RUAN Yi¹, LIU Yi-xing³

(1. College of Optoelectrics, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Department of Electronics and Communications Engineering, Changsha University, Changsha 410003, China;

3. College of Science, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The paper proposes a new approach of beam combination, in which the feasibility of volume Bragg gratings as the laser beam guiding device was analyzed. Based on Kogelnik's theory of coupled waves, the wavelength selectivity and angular selectivity of volume Bragg gratings were emphatically discussed. The experimental fabricating process was reported in detail. Two different wavelength lasers beam combination and two same wavelength lasers beam combination were performed. As a result, the feasibility of Bragg grating for beam combination was verified. In order to be used conveniently in practical operation, the special angle is taken into account. The optical path will be improved and the theoretic calculation also be simplified. The beam combination efficiency will be greatly improved.

Key words: Bragg's diffraction; volume grating; beam combination; diffraction efficiency; angular selectivity; wavelength selectivity

波束合成也称为激光并束, 按并束后的光束质量可分为相干并束和非相干并束两种^[1]。激光并束的主要方法又分为腔内并束和腔外并束^[2]两大类。本文主要讨论腔外非相干并束, 即激光光强叠加, 也常称为光谱合成。

传统的激光并束技术使用“反射镜”、“半透半反镜”, 并束光路设计方案很多, 但只能在形式上使两光束合并, 而不能同时保证激光的方向不变、截面积不变、合成功率(总功率)增大这三个条件。图 1(a)中简单地将激光器平行放置, 这样的非相干并束虽然保证了方向不变, 总功率加倍, 但并束后激光的截面积也加倍, 单位面积的功率密度未增大; 图 1(b)为激光器交叉放置, 这样的非相干并束虽然保证了截面积不变, 但在激光的交叉面上两束激光照射的方向不一致; 图 1(c)则是利用半透半反镜搭建的光路实现非相干并束, 虽然保证了方向的一致性, 截面积也保持不变, 但并束后的激光总功率没有增大。由此可见, 在不追求“增高亮度”的条件下, “并束”并不难, 难的是同时实现“并束”和“增高亮度”。

* 收稿日期: 2009- 10- 20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10676038)

作者简介: 刘莉(1980—), 女, 讲师, 博士生。

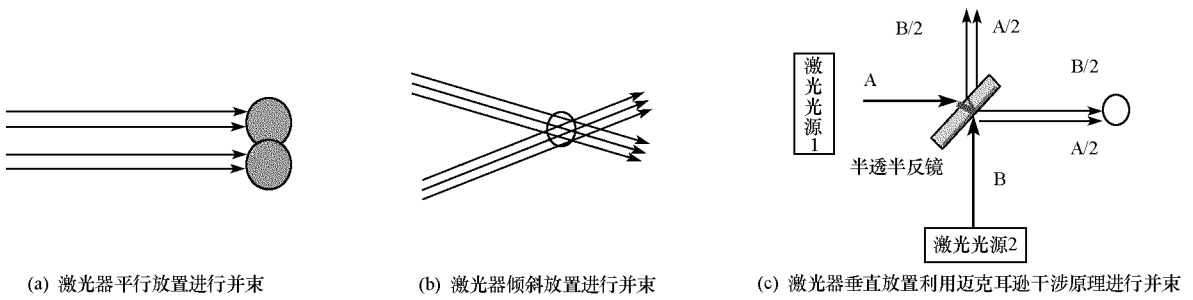


图1 传统的激光并束技术

Fig. 1 Traditional lasers beam combination technology

2003年, Ciapurin等^[3]用 Volume Bragg gratings (VBG) 实现了两路光谱合成。2008年, Andrusyak等^[4]利用四个反射式体布拉格光栅实现了五路高功率光纤激光器的光谱合成。国内对光谱合成的研究才刚刚起步, 国防科技大学蒲世兵等^[5]和空军工程大学占生宝等^[6]主要讨论了反射式布拉格光栅和透射体布拉格光栅频谱组束的物理模型。四川大学的张艳等^[7]对基于平面光栅的光谱合成做了数值计算。2009年占生宝等^[8]利用透射体布拉格光栅对频谱组束进行了实验研究, 但未见实物装置。除此之外, 国内还没有见到相关实验文献。

1 体布拉格全息光栅的原理

光折变效应是指光折变材料被某些波段的光照射后, 折射率会随光强的空间分布而发生变化的现象。体布拉格光栅是利用光学全息方法在存储材料中制作的一种体相位光栅, 也称为 Bragg 光栅。用两束短波长相干光在介质中形成干涉条纹, 光强的调制即干涉条纹的变化实时地在介质中激发折射率变化 Δn , 等价于入射光实时写入体相位光栅。入射光在写入折射率体相位栅的同时, 又经受自写入相位栅的衍射, 等价于全息光栅再现过程。

体光栅中折射率可表示为 $n^* = n + \Delta n \sin[2\pi f r \cos(\mathbf{K}_g \cdot \mathbf{r})]$, n 为体布拉格光栅的平均折射率; Δn 为折射率调制的振幅, r 为矢半径, \mathbf{K}_g 是光栅矢量, 大小是 $K_g = 2\pi/\Lambda = 2\pi f$, 方向垂直于峰值条纹平面。 Λ 为峰值条纹间距, f 为光栅的空间频率 ($f = 1/\Lambda$), 光栅的厚度为 d 。

根据 Kogelnik 耦合波理论^[9], 无吸收的透射型相位光栅的衍射效率为^[10-11]

$$\eta = \frac{\sin^2(\nu^2 + \xi^2)^{1/2}}{1 + (\xi/\nu)^2} \quad (1)$$

其中调制参数 ν 、布拉格失配矢量 ξ 分别由下面两式给出:

$$\nu = \frac{\pi \Delta n d}{\lambda (\cos \theta_r \cos \theta_s)^{1/2}} \quad (2)$$

$$\xi = \frac{\delta l}{2 \cos \theta_s} \quad (3)$$

当入射波的入射角对布拉格入射角 θ_0 的偏离为 $\Delta\theta$, 其波长对布拉格波长 λ_0 的偏移量为 $\Delta\lambda$ 时, 相位失配因子 δ 可以表示为

$$\delta = \Delta\theta K_g \sin(\phi - \theta_0) - \Delta\lambda^2 / 4\pi n_0 \quad (4)$$

式(4)说明这种光栅具有波长和角度的选择性。波长选择性是指在相同的入射角的情况下, 多波长信号光与 Bragg 光栅相作用, 只有特定波长成分才能够发生布拉格衍射; 角度的选择性是指对于特定波长的单一信号与 Bragg 光栅相作用, 只有满足特定角度才能够发生布拉格衍射。

当读出光满足布拉格条件入射时, 由式(4)和式(3)知 $\delta = 0$, $\xi = 0$, 此时衍射效率等于

$$\eta_0 = \sin^2 \nu \quad (5)$$

根据式(1)画出无吸收透射相位光栅归一化衍射效率 η 随布拉格失配矢量 ξ 的变化曲线, 如图2所示。可见, 在读出光以布拉格角入射时, 衍射效率将随介质厚度 d 及其折射率的空间调制 Δn 的增加而

增加, 当调制参量 $\nu = \pi/2$ 时, 衍射效率 $\eta_0 = 100\%$; 当 $\nu = \pi/4$ 或 $\nu = 3\pi/4$ 时, $\eta_0 = 50\%$ 。

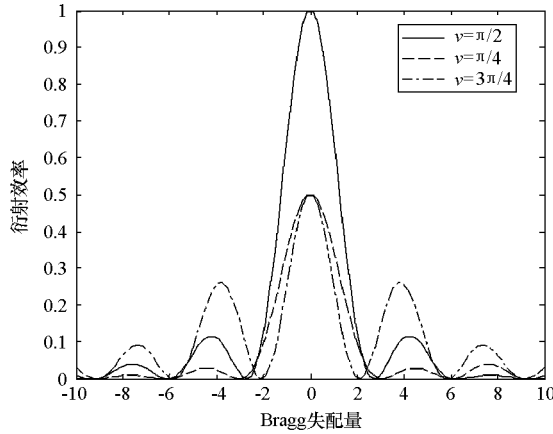


图 2 $\xi - \eta$ 曲线
Fig. 2 $\xi - \eta$ curve

通常将波长的偏移量称为光栅的带宽, 对应 $\eta - \xi$ 曲线的主瓣全宽度称为光栅的选择角, 用 $\Delta\theta$ 表示。当两个干涉光对称入射时, 形成非倾斜光栅。取 $\lambda = 632.8\text{nm}$, $n = 1.52$, $d = 40\mu\text{m}$, 并取 $\nu = \pi/2$, 作出带宽与入射角的关系图, 如图 3 所示, 可以看出透射型光栅的带宽随入射角增大而减小, 因为记录时入射角度越大, 光栅周期就越小, 则 K_g 就越大, 根据选择性公式得出光栅对角度偏移的反应也就越灵敏。作出选择角与入射角的关系图, 如图 4 所示, 可以看出透射型光栅的角度选择在 45° 附近角度敏感度最高, 选择角为 0.5° 左右, 若光线以其他角度入射, 选择角范围也在 2° 以内。

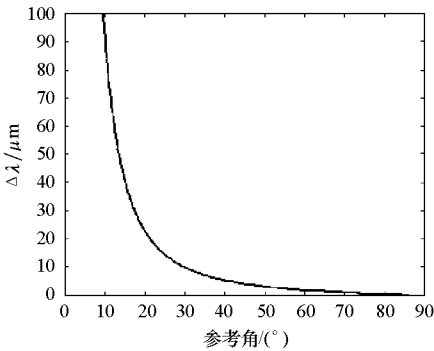


图 3 光栅波长选择示意图

Fig. 3 Schematic of the selectivity of wavelength of Bragg grating

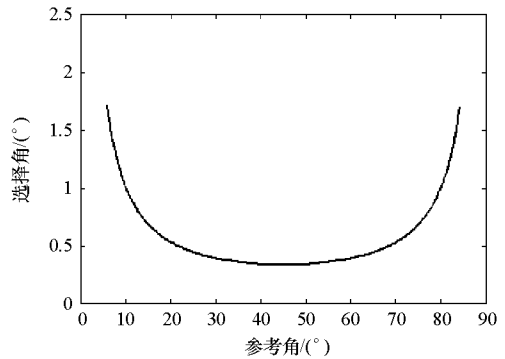


图 4 光栅选择角示意图

Fig. 4 Schematic of the selectivity of angle of Bragg

2 90° 配置布拉格光栅并束光路设计

体布拉格全息光栅的主要写入方式有 90° 配置、反射型和透射型三种。为了实际使用的方便, 理论上提出采用 90° 全息配置记录光栅, 采用如图 5 所示光路在光折变晶体内写入布拉格光栅, 物光波和参考光波的传播矢量 K_o 、 K_r 与光栅矢量 K_g 三矢量共面组成一个等腰三角形, 即 $K_g = K_r - K_o$ 。

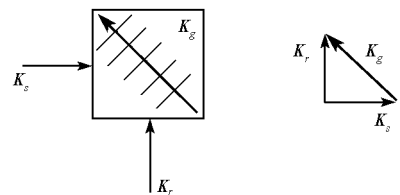


图 5 全息光栅写入

Fig. 5 The recording of holographic diffraction gratings

图 6 为全息光栅的两种读出方式, 1、2 分别为两种不同方向入射的光束, 3 为相应衍射光束, 从图中可以看出, 布拉格衍射的结果可以看作一种近似的镜面反射。

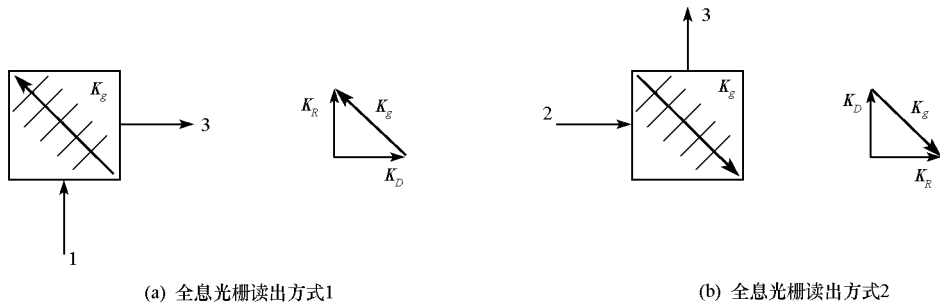


图6 全息光栅读出
Fig.6 The reading of holographic diffraction gratings

如果采用图7所示的并束光路, 波长为 λ 的光在A点以布拉格角入射, 受到布拉格光栅衍射后在C点出射, 波长为 λ' 的光在B点垂直入射, 由于不以布拉格角入射, 则在布拉格光栅内毫无影响地通过, 两光束在同一点C出射, 达到光强叠加的效果。这样, 波长为 λ' 的光角度确定为垂直入射, 入射点的位置只要满足使衍射光经C点出射即可, 大大简化了计算。但 90° 记录要求两面入射, 需要特殊的立体材料, 铌酸锂是文献中提到的较好的材料, 但实验中发现其衍射效率有待提高, 内部机理较复杂, 不便于重复实验研究。 90° 配置与反射、透射布拉格光栅在并束中的优缺点如表1所示。

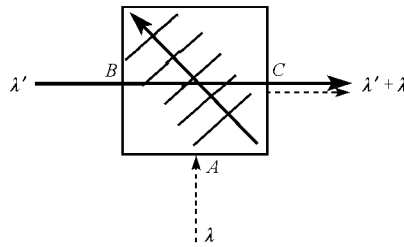


图7 并束原理示意图
Fig.7 Schematic of beam combination

表1 90° 配置布拉格光栅与反射透射布拉格光栅在并束设计中的优缺点

Tab.1 The advantages and disadvantages of 90° configuration and reflection/transmission Bragg grating for using in beam combination

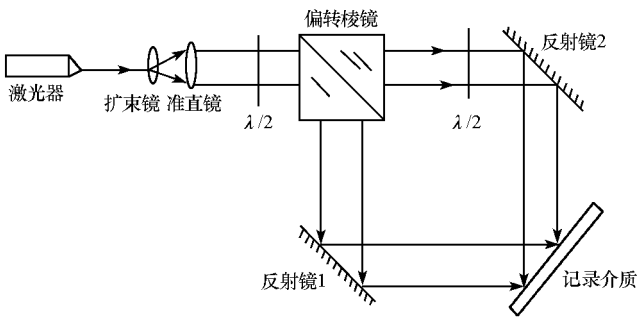
布拉格光栅类型	材料	优点	缺点
90° 配置布拉格光栅	铌酸锂晶体(体状)	光路简洁, 计算简便, 折射损失小, 反射可通过镀膜解决。	机理复杂, 与掺杂有关, 不容易保存, 可重复性不好。
反射透射布拉格光栅	photo-thermo-refractive (PTR) 光敏玻璃(片状)	耐热性强; 性质稳定; 衍射效率高达90%以上。	以布拉格角度精确入射, 需计算; 需定做; 价钱昂贵。
	光致聚合物(基片上薄膜)	价钱便宜; 在全息平台上即可开展多种研究性实验; 衍射效率60%左右。	不便于保存, 做好后必须马上开始实验并且耐热性差, 只用于演示、研究。

3 基于体布拉格全息光栅的并束光路设计及实现

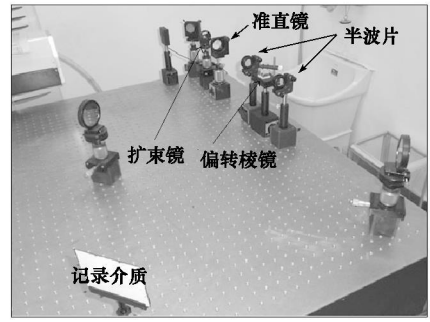
3.1 均匀布拉格光栅的制备

采用双光束干涉法, 通过对激光束进行分束, 利用相干激光束的干涉形成空间光强的周期性分布。用记录介质记录下干涉条纹分布, 经过显影、定影后形成体布拉格光栅。

制作透射型体布拉格光栅的实验光路图如图8所示。其中偏转棱镜的作用是使不同方向偏振光(o光和e光)分开, 半波片1用来调节两束光的光强比, 半波片2用来调节光束2的偏振方向。



(a) 布拉格光栅制备原理图



(b) 布拉格光栅制备实际光路图

图 8 透射型均匀体布拉格光栅制备光路图

Fig. 8 Practical optical pathway diagram of the Bragg grating manufacture

3.2 布拉格光栅的衍射实验

图9为实验中制作的布拉格光栅在原子力显微镜下的图像。在制作光栅的光路中用黑屏遮住一束光,用另一束光照射光栅,可看到激光经体布拉格光栅后的衍射现象,左边为透射光斑,右边为衍射光斑,如图10所示。

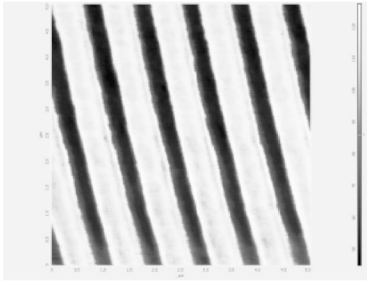


图 9 原子力显微镜体布拉格光栅

Fig. 9 Schematic of the Bragg grating by AFM

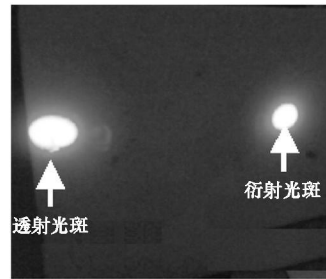
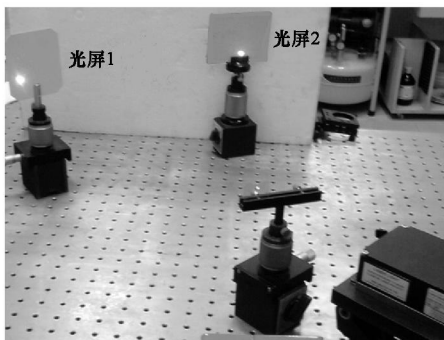


图 10 体布拉格光栅衍射现象

Fig. 10 The diffraction phenomenon of volume Bragg gratings

3.3 基于布拉格全息光栅的并束实验

如图11(a)所示,He-Ne激光器发出的632.8nm的红色激光经过布拉格光栅时,一部分继续沿原方向透射至光屏2,另一部分被布拉格光栅衍射到光屏1,与透射的532nm的绿色激光进行非相干并束,合成为黄色激光斑点。图11(b)为两束He-Ne激光器进行并束的实验,右边斑点为632.8nm红色激光经过布拉格光栅的透射光,左边斑点为632.8nm红色激光经过布拉格光栅的衍射光与另一束632.8nm红色激光透射光的非相干并束,合成光斑仍为红色。并束后的激光满足了截面积不变而合成功率增大的并



(a) 红光和绿光两路光束合成实际光路图



(b) 红光和红光两路光束合成实际光路图

图 11 两路光束合成实际光路图

Fig. 11 The practical optical pathway diagram of two lasers beams combining

束要求。

4 结论

90°配置的布拉格光栅,由于光束垂直入射即可满足布拉格条件,使实验更加容易操作,但由于光栅制作中要求两面入射,需要立体的铈酸锂材料,其衍射效率有待提高,内部机理较复杂。

实验完成了2束不同波长的激光并束、2束同种波长的激光并束实验,验证了利用布拉格光栅进行并束的可行性。但本实验采用的是光致聚合物光栅,写入光栅后的保存时间是个问题,并且对激光的耐热性不佳,所以只是布拉格光栅并束的可行性验证实验。而光热折变 photo-thermo-refractive (PTR) 无机玻璃(又叫光敏玻璃)可以解决这些问题,并且 PTR 玻璃上的体布拉格光栅 Volume Bragg gratings (VBG)^[12-13]能承受高能激光的辐照,使它们成为高能激光光谱叠加的理想器件。

由于入射光不是严格的单色光,有一定的线型分布,并且体布拉格光栅也有一定的吸收,因此,衍射光的效率和透射光的透光率都达不到 100%。用一个布拉格光栅实现了两路激光的并束,实际上按此原理还可完成多路光束的并束,但并束的光束个数是有限制的^[6]。

参考文献:

- [1] Fan T Y, Sanchez A. Coherent (Phased Array) and Wavelength (Spectral) Beam Combining Compared[C]//Proc. of SPIE, 2005, 5709: 1572164.
- [2] Daneu V, Sanchez A, Fan T Y, et al. Spectral Beam Combining of a Broad-strip Diode Laser Array in an External Cavity[J]. Opt. Lett., 2000, 25(6): 4052407.
- [3] Ciapurin I V, Glebov L B, Glebova L N, et al. Incoherent Combining of 100W Yb-fiber Laser Beams by PTR Bragg grating [C]//Proc. SPIE, 2003, 4974:209- 219.
- [4] Andrusyak O, Ciapurin I, Simirnov V, et al. External and Common-cavity High Spectral Density Beam Combining of High Power Fiber Lasers[C]//Proc. of SPIE, 2008, 6873: 687314.
- [5] 蒲世兵,姜宗福,许晓军. 基于体布拉格光栅的光谱合成的数值分析[J]. 强激光与粒子束,2008,20(5): 721- 724.
- [6] 占生宝,赵尚弘,胥杰,等. 基于透射体布拉格光栅频谱组束的研究[J]. 光电子·激光,2008,19(3):318- 321.
- [7] 张艳,张彬,祝颂军. 谱合成光束特性的模拟分析[J]. 物理学报,2007,56(8):4590- 4595.
- [8] 占生宝,赵尚弘,吴卓亮,等. 基于透射体布拉格光栅频谱组束的实验研究[J]. 光电子激光,2009,20(5): 587- 589.
- [9] Kogelnik H. Coupled Wave Theory for Thick Hologram Gratings [J]. Bell System Technical Journal, 1996,48(9): 2909- 2947.
- [10] 陶世荃,王大勇,江竹青,等. 光全息存储[M]. 北京:北京工业大学出版社,1998.
- [11] 于美文. 光全息学及其应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,1996.
- [12] Ciapurin I V, Glebov L B, Smirnov V I. Modeling of Gaussian Beam Diffraction on Volume Bragg Gratings in PTR Glass [C]//Proc. of SPIE, 2005, 5742: 183- 194.
- [13] Efimov O M, Glebov L B, Smirnov V I. High Efficiency Volume Diffractive Elements in Photo-thermo-refractive Glass[P]. U- SP6673497B2. USA, 2004.