

# 计算机模拟偏振对激光全息的影响<sup>\*</sup>

苏慧敏 郑锡光 王 霞 许剑锋 汪河洲<sup>†</sup>

(中山大学超快速激光光谱学国家重点实验室 广州 510275)

(2001 年 8 月 5 日收到 2001 年 10 月 22 日收到修改稿)

通过计算机对多束激光相干产生的空间干涉光场进行模拟,归纳出光束偏振态改变时,激光相干产生光学晶格效果的变化规律,提供了激光全息技术中激光束偏振态的最佳组合,使激光全息技术制作理想的亚微米单晶结构更方便快捷,还通过实验验证了理论模拟结果,实验结果与计算机模拟结果完全一致.

关键词:激光全息技术,偏振态,光学晶格,光子晶体

PACC: 4240K, 4225, 4290, 4270Q

## 1. 引 言

众所周知,相干的多束光可在相干区域形成类似晶格结构的干涉图案,其中,用激光光束形成的周期光强分布有序性非常高.通过改变光束的传播方向,两束、三束和四束光干涉能分别形成具有一维、二维、三维周期性的不同场强分布.这种由激光空间干涉光场形成的周期场强分布被称为光学晶格.在光学晶格中,每个光强极大点都是一个光势阱.在一定的条件下,原子或微小颗粒会由于光梯度力而被束缚于陷阱中,构成特殊的介电结构<sup>[1-3]</sup>.由于这类结构的周期尺寸处于光波长量级,其特殊的光学性质使之在研制新一代光电材料和器件(例如场发射显示、液晶显示器件)等方面具有重要意义<sup>[4,5]</sup>.

近十年来,光子晶体的研究备受瞩目,成为光子学的一个热门领域,人工制作三维光子晶体也是其中的一个焦点.激光全息技术作为一种微加工方法,通过光与物质的相互作用,利用光势阱来捕获微粒,可产生各种不同的微粒空间结构<sup>[6,7]</sup>.1997年, Berger及其同事用三个光栅的激光衍射图叠加,结合光刻方法制作了二维六角周期结构<sup>[8]</sup>.2000年, Campbell研究小组采用四束  $0.355\mu\text{m}$  的紫外激光全息干涉产生光学晶格,结合紫外光聚合,成功地制备出三维面心亚微米周期结构<sup>[9]</sup>,这是微制作技术在光子晶体研究中应用的一大进步,形成了受到人们普遍关注

的周期常数在亚微米量级的激光全息技术(Holographic Lithography)微加工制作方法,使人们进一步看到了激光全息技术的应用前景和潜力.理论上已经证明,所有的简单光学晶格都可以通过多光束激光干涉全息方法得到<sup>[10]</sup>.

激光全息技术制作亚光学波长晶格的最关键因素之一是各光束偏振的调节.在多光束干涉实验中,若几束光不在同一平面内,它们的电矢量方向不可能完全一致,它们之间的相干只能是各束光在特定方向上的分量之间的相干,而总的相干效应是三个垂直的偏振分量各自相干的几何叠加.光束电矢量之间的偏差会使干涉图案的光强亮暗对比度降低.这一效果在光束夹角较大时尤其突出.文献[11]中指出,当光束间夹角大于  $19^\circ$  时,三束入射光在会聚处的偏振不再相互平行,干涉场有个大的背景,造成光势阱变浅,非常不利于材料有序结构的形成.但另一方面,要想得到周期常数较小的光学晶格,势必要增大光束间的夹角,大角度干涉不可避免.因此,分析光束偏振对干涉形成的光学晶格的影响并找出最佳的偏振方向组合势在必行.

粗略地看,光束偏振对光学晶格的影响包括:首先,各光束偏振方向的改变会使干涉图案的光强极大值与极小值的大小和绝对位置发生变化;其次,光束之间的夹角的大小将影响干涉图案所能达到的最大对比度.然而,这些因素对图案的影响都不是单调变化的,在实验中摸索具有很大的盲目性,因此,在理论

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号:19934002和19874083)、教育部重点基金和广东省自然科学基金资助的课题.

<sup>†</sup> 通信联系人, E-mail: stswzh@zsu.edu.cn

上找出其变化规律十分必要. 本文通过计算机模拟, 利用平面波叠加原理, 计算多光束干涉的光强空间分布, 从而找出特定情况下多束光偏振方向的最优组合. 同时, 实验结果也很好验证了理论推导.

## 2. 计算机模拟实验原理和实验装置

波矢分别为  $k_1, k_2, k_3, \dots, k_N$  的  $N$  束光在交点处干涉的光强空间分布表达式为

$$\begin{aligned}
 I(\mathbf{r}) &= \left[ \sum_{j=1}^N E_j(\mathbf{r}) \exp(i\mathbf{k}_j \cdot \mathbf{r}) \right] \\
 &\quad \times \left[ \sum_{j=1}^N E_j^*(\mathbf{r}) \exp(-i\mathbf{k}_j \cdot \mathbf{r}) \right] \\
 &= \sum_i |E_i|^2 + \sum_{i \neq j} E_i^* \cdot E_j \cdot e^{i(\mathbf{k}_j - \mathbf{k}_i) \cdot \mathbf{r}} \quad (1)
 \end{aligned}$$

其中,  $E_i(\mathbf{r}), k_i$  分别是第  $i$  束平面光波的复振幅和波矢.

由(1)式可知, 当  $2 \leq N \leq 4$  时, 多束光相干产生的是以  $\mathbf{b}_m = \mathbf{k}_j - \mathbf{k}_i$  ( $m = 1, 2, \dots, N-1; i, j = 1, 2, \dots, N; i \neq j$ ) 为倒格矢的光学晶格. 改变入射光的波矢  $k_j$  的方向, 就会引起  $I(\mathbf{r})$  的不同空间分布, 从而可得到不同点阵结构的光学晶格.

尽管光学晶格的点阵结构仅由波矢量  $k_j - k_i$  的大小和方向决定, 但是光学格点的亮暗对比度与各光束偏振组合  $E_j^* \cdot E_i$  有关.

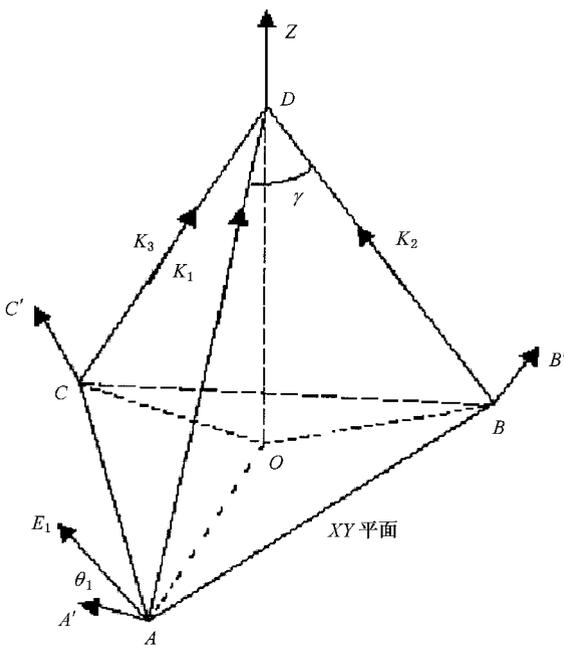


图1 多光束干涉示意图

实验验证所用光路与计算机模拟完全一致, 即如图1所示. 计算机模拟得到的主要结果都用实验加以验证. 计算机模拟的各种偏振态对应的干涉图案在实验中都给予展现. 实验所得的各种偏振态对应的干涉图案是由显微镜放大, 再由 CCD 纪录.

## 3. 计算机模拟和实验结果及讨论

以不在同一平面内的三束光的干涉为例, 讨论光束偏振态对干涉图案的影响.

设三束光波矢量 ( $k_1, k_2$  和  $k_3$ ) 呈三重旋转轴对称排列, 且两两夹角为  $\gamma$ , 如图1建立空间直角坐标系,  $Z$  轴与三束光波矢方向的夹角均相等, 各光束光强相等, 则形成的干涉图案是平行于  $XY$  平面的平面三角结构.

如图1所示,  $AA'$  在平面  $OAD$  内, 且  $AA'$  垂直于  $k_1$ , 定义  $E_1$  的偏振角为以  $AA'$  为始边, 以  $k_1$  为轴, 逆时针转过的角度  $\theta_1$ , 同样定义  $\theta_2, \theta_3$  分别为以  $BB', CC'$  为轴逆时针转过的角度.

考虑到三束光波矢的空间对称性,  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  的取值范围分别为  $0 \leq \theta_1 \leq \pi, 0 \leq \theta_2, \theta_3 \leq 2\pi$ .

在挑选最优解的时候, 同时遵循两个判据: 一是出于干涉图案质量的要求, 选取对比度较大的解; 二是出于能量的考虑, 选取光强极大值较大的解.

表1为  $\gamma = \pi/12$  时的最优解, 都满足  $\theta_2 - \theta_1 = \theta_3 - \theta_2 = \pi/3$ . 从图2可以看出这样的偏振角使得三束光的偏振方向在  $XY$  平面的投影在一条直线上.

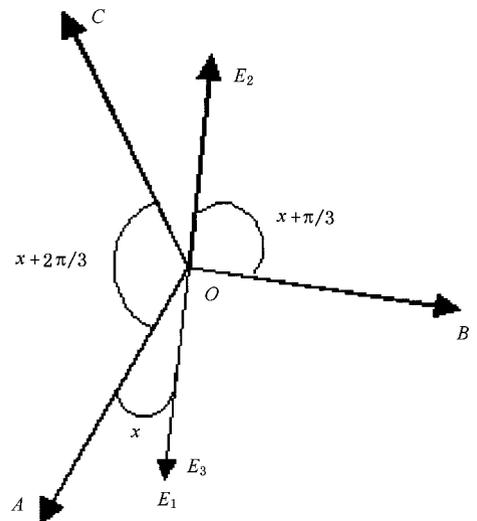


图2 三束光偏振矢量在  $XY$  平面上的投影 ( $A, B, C, O$  定义如图1)

$$\gamma = \pi/12, \theta_1 = x, \theta_2 = x + \pi/3, \theta_3 = x + 2\pi/3$$

表 1  $\gamma = \pi/12$  时的最优解

$\gamma/\text{rad}$	$\theta_1/\text{rad}$	$\theta_2/\text{rad}$	$\theta_3/\text{rad}$	对比度	光强极大值
$\pi/12$	0	$\pi/3$	$2\pi/3$	0.989	8.897
	$X$	$x + \pi/3$	$x + 2\pi/3$	0.989	8.897

如图 3 所示,若固定其中两束光的偏振方向( $\theta_1 = 0, \theta_2 = \pi/3$ ),改变第三束光的偏振角,则光强极大值和对比度都以  $\pi$  为周期变化,两者的峰值重合,在一个周期内只有一个最大值和一个最小值.通过调整光束的偏振角,对比度和光强极大值所能达到的最大值分别为 0.989 和 8.897.

在图 4 中显示了改变第三束光偏振角时干涉图案的一系列变化.第一组为计算机模拟图,第二组和第三组是对应条件下三个偏振矢量在  $XY$  平面上的投影示意图和实验中拍摄的三光束干涉图.随着偏振角度对最优解的偏离,亮斑的光强逐渐下降,并且逐渐变形,向一个方向拉长;最后,三角点阵分布的

图案退化为条纹.

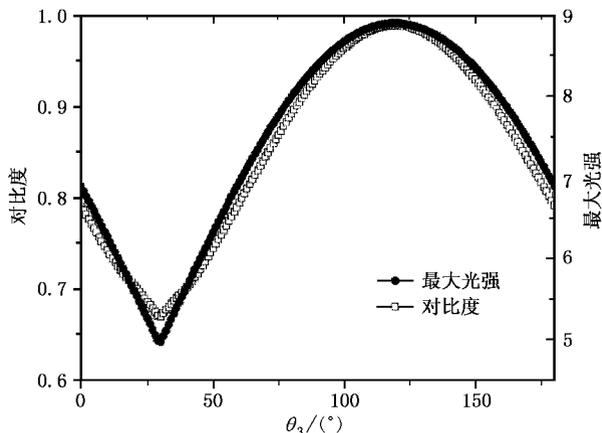


图 3 对比度和光强极大值随  $\theta_3$  的变化曲线 ( $\gamma = \pi/12, \theta_1 = 0, \theta_2 = \pi/3$ )

图 5 是三束光成大角度夹角( $\gamma = \pi/3$ )时对比度

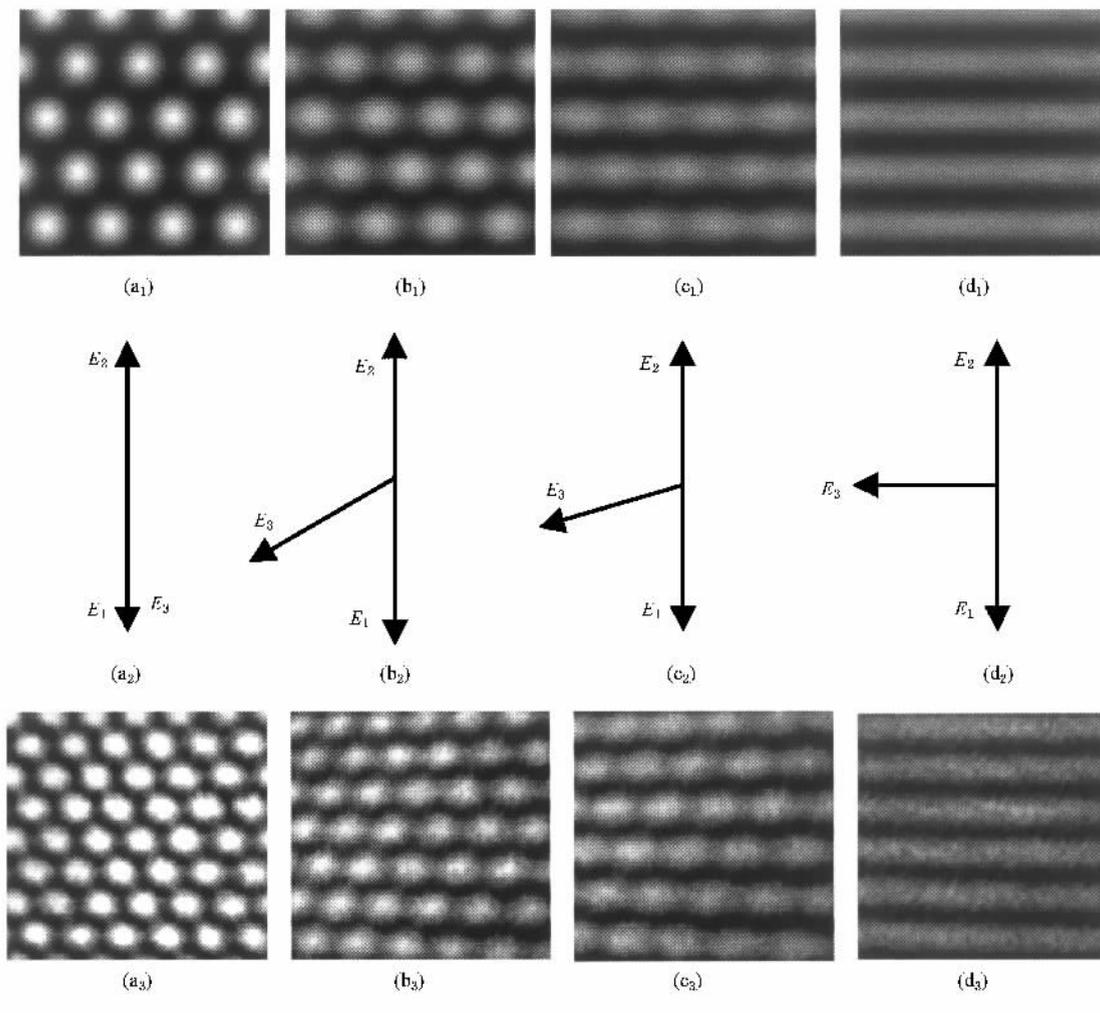


图 4 平面三角点阵随偏振角的退化( $\gamma = \pi/12$ )

(a)  $\theta_1 = \pi/3, \theta_2 = 2\pi/3, \theta_3 = \pi$  (b)  $\theta_1 = \pi/3, \theta_2 = 2\pi/3, \theta_3 = 2\pi/3$  (c)  $\theta_1 = \pi/3, \theta_2 = 2\pi/3, \theta_3 = 5\pi/9$  (d)  $\theta_1 = \pi/3, \theta_2 = 2\pi/3, \theta_3 = \pi/2$

和光强极大值随偏振角  $\theta_3$  的变化曲线, 在  $\theta_1 = 17\pi/36$ ,  $\theta_2 = \pi/12$  时, 改变  $\theta_3$  能使图像的对比度达到接近 1. 对于很多只强调对比度越高越好的应用, 则对比度达到接近 1 时的解为较优解.

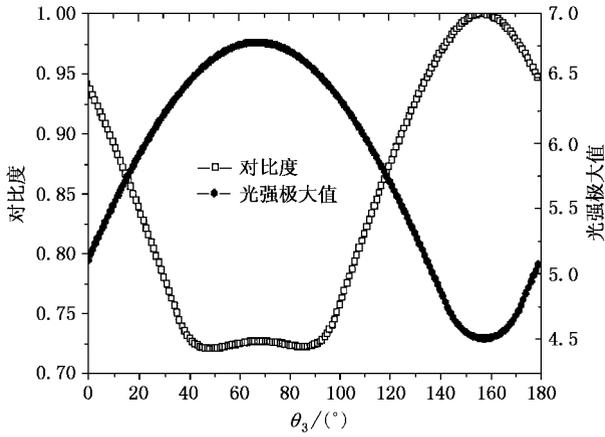


图 5 对比度和光强极大值随  $\theta_3$  的变化曲线  
( $\gamma = \pi/3$ ,  $\theta_1 = 17\pi/36$ ,  $\theta_2 = \pi/12$ )

表 2  $\gamma = \pi/3$  时的几组对比度达到接近 1 的解

$\gamma/\text{rad}$	$\theta_1/\text{rad}$	$\theta_2/\text{rad}$	$\theta_3/\text{rad}$	对比度	光强极大值
$\pi/3$	$\pi/12$	$31\pi/36$	$17\pi/36$	0.999	4.51
	$\pi/9$	$8\pi/9$	$\pi/2$	0.999	4.50
	$5\pi/36$	$33\pi/36$	$19\pi/36$	0.999	4.51
	$17\pi/36$	$\pi/12$	$31\pi/36$	0.999	4.51

从图 5 可以看到, 对比度和光强极大值所能达到的峰值不再重合, 从而使偏振角度的选取不能两者同时兼顾. 光强极大值所能达到的最大值小于 6.8, 说明能量利用率显著下降. 同时, 相对于小角度干涉, 对比度函数波形在峰值附近更为陡峭, 意味着偏振角度的微小变化必然引起图像对比度的剧烈变化. 因此, 权衡两者对干涉图案质量的影响, 我们选择使对比度和光强极大值都接近峰值的偏振组合作为较优解 (表 3). 可以看到, 三束光的偏振角不再满足相差  $\pi/3$  的关系.

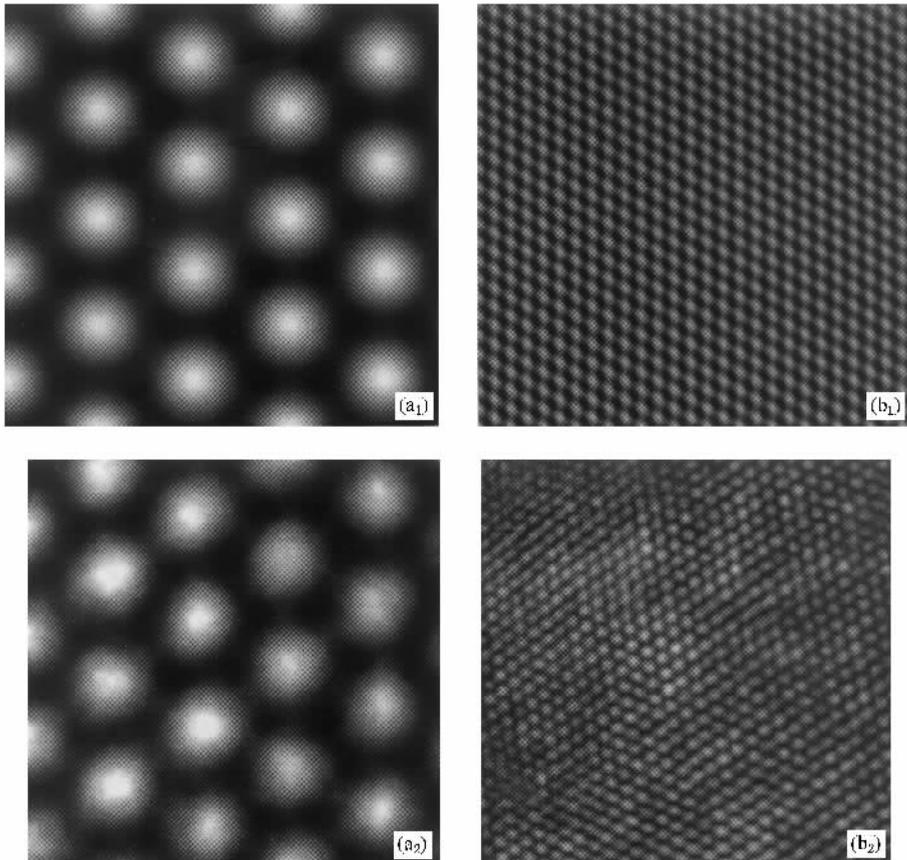


图 6 三光束干涉图案的计算机模拟图与实验拍摄图

- (a)  $\gamma = \pi/12$ ,  $\theta_1 = 0$ ,  $\theta_2 = \pi/3$ ,  $\theta_3 = 2\pi/3$ , 对比度 = 0.989, 光强极大值 = 8.897;
- (b)  $\gamma = \pi/3$ ,  $\theta_1 = \pi/36$ ,  $\theta_2 = \pi/2$ ,  $\theta_3 = 0$ , 对比度 = 0.93, 光强极大值 = 6.03

表 3  $\gamma = \pi/3$  时的几组较优解

$\gamma/\text{rad}$	$\theta_1/\text{rad}$	$\theta_2/\text{rad}$	$\theta_3/\text{rad}$	对比度	光强极大值
$\pi/3$	0	$\pi/36$	$\pi/2$	0.93	6.03
	0	$17\pi/36$	$35\pi/36$	0.93	6.03
	$\pi/36$	$\pi/2$	0	0.93	6.03
	$17\pi/36$	$35\pi/36$	0	0.93	6.03

另外,对比大角度干涉图和小角度干涉图,当光束间夹角很小时,干涉图案的光强极大值的绝对位置几乎不随偏振角度的改变而变化;光束间夹角较大时,光强极大值的绝对位置随着较优解的出现而发生周期性变化,呈现明暗交替的现象。

图 6 显示了光束间夹角分别为  $\pi/12$  和  $\pi/3$  时干

涉图案的计算机模拟图以及实际干涉图,两种情况下,图像的对比度和光强极大值均有很大差异。

本文所述的计算机模拟方法同样适用于四束光干涉形成的三维场强空间分布,它能快速准确地找出形成最优干涉图案的各束光的偏振方向。除上述实验验证外,我们在可见光聚合全息制作实验研究中,利用本文提供的模拟结果的偏振态最优组合,已成功制备出亚微米量级的周期有序结构<sup>[12]</sup>。

从上述的讨论可以看出多光束干涉中各束光偏振方向对干涉图案的显著影响,这些规律对实验研究的成功是很有意义的。

- [ 1 ] Ashkin A 1978 *Phys. Rev. Lett.* **40** 729
- [ 2 ] Burns M M, Fournier J M and Golovchenko J A 1989 *Phys. Rev. Lett.* **63** 1233
- [ 3 ] Burns M M, Fournier J M and Golovchenko J A 1990 *Science* **249** 749
- [ 4 ] Nole J 1997 *Laser Focus World* 200 May
- [ 5 ] He Y J *et al* 2001 *Acta. Phys. Sin.* **50** 892 [ in Chinese ] 何拥军等 2001 物理学报 **50** 892 ]
- [ 6 ] Yablonovitch E, Gmitter T J and Leung K M 1991 *Phys. Rev. Lett.* **67** 2295
- [ 7 ] Katsarakis N, Chatzitheodoridis E, Kiriakidis G, Sigalas M M, Soukoulis C M, Leung W L and Tuttle G 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 3263

- [ 8 ] Berger V, Gauthier-Lafaye O and Costard E 1997 *J. Appl. Phys.* **82** 60
- [ 9 ] Campbell M, Sharp D N, Harrison M T, Denning R G and Turerfield A J 2000 *Nature* **404** 53
- [ 10 ] Mei D B, Cheng B Y, Hu W, Li Z L and Zhang D Z 1995 *Opt. Lett.* **20** 429
- [ 11 ] Hu W, Li H Q, Cheng B Y, Yang J H, Li Z L, Xu J R and Zhang D Z 1995 *Opt. Lett.* **20** 964
- [ 12 ] Wang X, Xu J F, Su H M, He Y J, Jiang S J, Wang H Z, Zeng Z H and Chen Y L 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 527 [ in Chinese ] 王霞等 2002 物理学报 **51** 527 ]

## Computer simulation of the effect of polarization on the laser holography<sup>\*</sup>

Su Hui-Min Zheng Xi-Guang Wang Xia Xu Jian-Feng Wang He-Zhou<sup>†</sup>

( State Key Laboratory of Ultrafast Laser Spectroscopy, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China )

( Received 8 August 2001 ; revised manuscript received 22 October 2001 )

### Abstract

A self-designed computer simulation of the multi-laser-beam interference is introduced to the study of the relationship between the polarization of light and the clarity of the interference pattern, which provides the optimal solution of the polarization on holographic lithography technology and improves the fabrication of sub-micrometer periodic structure much more efficiently. The experimental results are consistent with the results of computer simulation.

**Keywords** : holographic lithography technology, polarization, optical lattice, photonic crystal

**PACC** : 4240K, 4225, 4290, 4270Q

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 19934002, 19874083 ), Natural Science Foundation of Guangdong Province and Natural Science Foundation of Education Ministry of China.

<sup>†</sup> Corresponding author, E-mail: stshwh@zsu.edu.cn