

# 用多光束干涉模拟晶格图案\*

程丙英 张毅 梅东滨 张蓉 李兆霖 胡炜 张道中  
(中国科学院物理所, 光物理开放实验室, 北京 100080)

**摘 要** 利用多束激光干涉, 可形成三维晶格结构。计算结果指出, 用四束光或六束光可形成大部分的布拉格(Bragg)点阵。同时用 He-Ne 激光器获得了体心正方和面心立方的相干图案, 晶格常数和计算结果相符。该研究对构成可见和红外区域的光子晶体有一定意义。

**关键词** 晶格, 多光束干涉。

众所周知, 用两束和三束光各能形成一维和二维的干涉图案。近几年人们致力于用多束光形成三维周期图案。由于这种场强结构的周期可小到光学波长的量级, 它在原子光学和光子学等领域正得到广泛应用。最近, 已有成功地将中性原子束缚于几束光干涉形成的三维晶格中的报道<sup>[1]</sup>。原子在这种周期的光场中受到偶极力的作用而被束缚于波腹点阵中, 并被冷却到  $10^{-6}$  K。

Burns 等人曾将三束光形成的蜂窝状点阵应用于聚苯乙烯小球的二维晶化排列<sup>[2]</sup>。本文作者曾将高折射率的  $\text{TiO}_2$  小颗粒成功地束缚于二维的周期光场中, 其栅格常数短到  $0.8 \mu\text{m}$ <sup>[3]</sup>。然而, 是否能够通过多光束干涉形成各种三维晶格图案, 特别是一些高次对称的图案如体心、面心和简单立方呢? 根据计算, 发现 14 种基本的布拉格点阵大部分能够通过多光束干涉构成。如能将高折射率的电介质小球束缚于这种晶格点阵中, 则有可能形成具有完全带隙的可见光波段的光子晶体。

多束激光相干使光强呈周期性分布。增加或减少相干光的数目及改变光束之间的夹角都会导致结构不同的相干图案。而改变波长只会引起栅格常数的变化, 并不改变结构本身。另一方面, 同一种结构可用不同的相干方式获得。基于对称性的考虑, 要构成一个三维周期的相干图案, 至少需要四束对称排列的入射光。本文数值模拟了波长分别为 514 nm 和 632 nm、在不同入射光束参数时的强度分布。以相干光强极大的波腹点在空间的位置作为格点标记, 获得了各种入射条件下的结构类型。

四束光干涉如图 1 所示, 取球坐标的原点作为相干区域的中心点。每束光的极角和方位角分别用  $\theta_i$  和  $\phi_i$  表示。其中第 1、2 束在 A 平面内, 第 3、4 束在 B 平面内, 且平面内的每束光与另一平面的每束光的极角互补。如果平面 A 与 B 不垂直, 得到的图案为体心单斜或四方晶系。否则它是体心正方晶系。当极角为某些确定值时, 正方变为立方。

\* 国家自然科学基金资助项目

收稿日期: 1995 年 3 月 28 日; 收到修改稿日期: 1995 年 6 月 26 日

采用六束光干涉时,波腹点阵可构成简单的四方、立方和六方晶系。它是在图 1 所示四束光的排列基础上,在 B 面两束光相反的方向上各加入另一束光。如图 2 所示,第 3、4 束在 A 面,第 1、2、5、6 束在 B 面。类似地,当平面 A 与 B 不垂直时可形成单斜或四方图案。否则为简单正方图案。当满足一定的极角条件时,正方晶系成为立方晶系。在入射波长为 514 nm 时,四方晶系的栅格常数随  $\theta_1$  和  $\phi$  的变化在十几到几十微米的范围内。而正方晶系的栅格常数仅随  $\theta_1$  在变。 $\theta$  值变小时,栅格常数变大。立方晶系的栅格常数为 0.45  $\mu\text{m}$ 。六方晶系是在简单立方的条件下,将 B 面内两束光的  $\theta$  角减少到一半,即 28° 时的结果。此时栅格常数  $c = 17.7 \mu\text{m}$ ,  $a = b = 0.63 \mu\text{m}$ 。上述几种晶系的光束参数列于表 1。

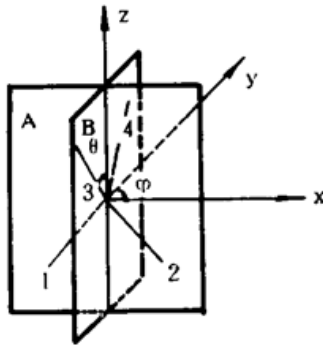


Fig. 1 The relative positions of 4 incident beams

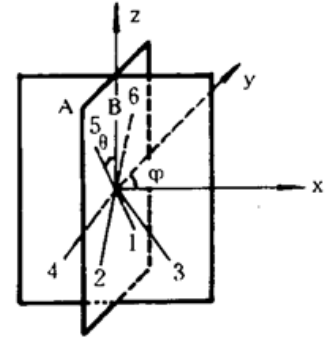


Fig. 2 The relative positions of 6 incident beams

Table 1. Incident parameters for crystal lattice patterns at 514 nm

crystal lattice	number of incident beams	relation between planes A and B	polar angle	lattice constant	
monoclinic	4, 6	not orthogonal	variable		
orthorhombic	4, 6	not orthogonal	fixed		
tetragonal	4, 6	orthogonal	variable		
cubic	bcc	4	orthogonal	$\theta_1 = \theta_2 = 54.8^\circ, \theta_3 = \theta_4 = 125.2^\circ$	0.45 $\mu\text{m}$
	fcc	4	orthogonal	$\theta_1 = \theta_2 = 63.3^\circ, \theta_3 = \theta_4 = 116.7^\circ$	0.57 $\mu\text{m}$
	sc	6	orthogonal	$\theta_1 \sim \theta_4 = 54.8^\circ, \theta_5 = \theta_6 = 125.2^\circ$	0.45 $\mu\text{m}$
hexagonal	6	orthogonal	$\theta_1 = \theta_3 = 54.8^\circ$	$c = 17.7 \mu\text{m}$ $a = b = 0.63 \mu\text{m}$	
			$\theta_2 = \theta_4 = 28.2^\circ$		
			$\theta_5 = \theta_6 = 125.2^\circ$		

按照表 1 所给的参数,几束光几乎要从两个相反的方向射向原点。这在实验安排上很困难。因此,本文设计了一种实用光路,使光束从相同的半空间内射向原点。模拟计算指出,能达到此要求的参数为:让第 1 束光与  $z$  轴同向,另三束光以相同的极角射向原点。此时相干图案的结构有两类:1) 第 2、3 束光位于 A 面,并对称地分布在  $z$  向两旁。第 4 束光位于 B 面。此时相干图案为体心四方。当  $\theta$  从 10° 变到 50° 时,在  $xy$  平面内的栅格常数从 3.6  $\mu\text{m}$  变到 0.8  $\mu\text{m}$ 。 $z$  向的栅格常数从 41.6  $\mu\text{m}$  变到 1.77  $\mu\text{m}$ 。2) 另三束光之间的夹角两两相等,即方位角差均为 120° 时,图案为面心结构。栅格常数随  $\theta$  的变化在 20  $\mu\text{m}$  到 1  $\mu\text{m}$  之间。如果用 He-Ne 激光作为相干光束,相应的  $\theta$  角应为 39° 就能获得栅格常数为 1.6  $\mu\text{m}$  的面心立方结构。

在进行以上模拟计算时,假定了所有光束的偏振方向都相同,实际上做不到这一点。当几束光不是在一个面内射向一点时,它们电矢量的方向总是存在不一致性。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矢量各自相干的几何叠加。其极大值的位置并不发生改变,但极强与极暗点的光强对比减弱。然而这种效应

在小的  $\theta$  角时并不明显。 $\theta$  角的取值即使很大时,只要适当选取各束光的偏振方向,使它们的偏振尽可能地同向,对比度变化就不会很大。现以形成面心立方结构为例,看一看考虑偏振方向后的效果。假设四束  $0.63 \mu\text{m}$  光的强度均为单位 1, A 束沿  $z$  轴入射,其余 3 束以  $39^\circ$  的极角围绕  $z$  轴对称分布。其中 B 束光在  $xz$  平面内, C 束和 D 束光在  $xy$  平面上的投影与  $x$  轴的夹角分别为  $120^\circ$  和  $240^\circ$ , 设置各束光的偏振如下: A 束为  $x$  方向, 三个垂直分量为  $E_x = 1, E_y = E_z = 0$ ; B 光在  $xz$  平面内偏振,  $E_x = \cos 39^\circ, E_y = 0, E_z = \sin 39^\circ$ ; C 光为  $xy$  平面内偏振,  $E_x = \cos 30^\circ, E_y = \sin 30^\circ, E_z = 0$ ; D 光为  $xy$  平面内偏振,  $E_x = \cos 30^\circ, E_y = -\sin 30^\circ, E_z = 0$ 。此时,波腹处的光强为 12.7, 而波节处仅为 0.4, 两者的比值仍大于 30。由此可知,由于入射角度不同引起的强度改变不是很严重的。

实验采用了激光束从半个空间内射向一点的方案,即在上述 1) 和 2) 条件下进行。一束单模 40 mW 的 He-Ne 激光被分成强度相等、偏振方向尽可能一致的四束光。这几束光分别通过折返镜组以及相位补偿器后射向一点。把用于放大相干图案的高倍显微镜的物镜焦面调到光束交叉区域。若焦面所在的平面为  $xy$  平面,显微镜可在  $z$  方向上作微动。放大倍数可在 640、1000 或 1600 倍之间变换。

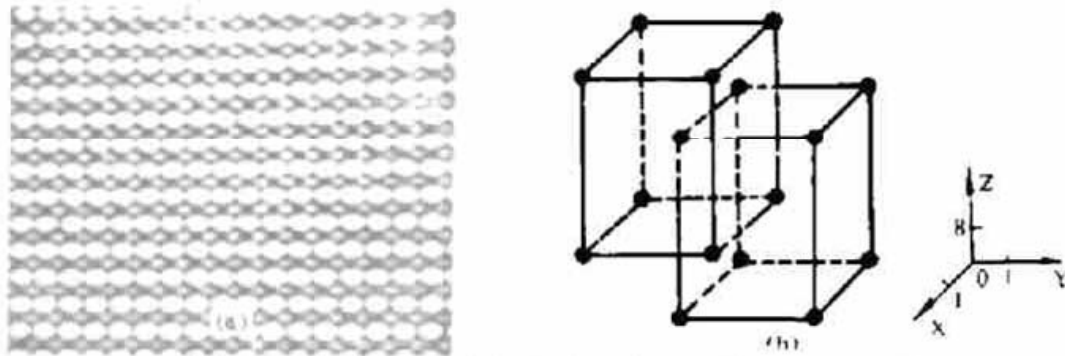


Fig. 3 The body centered structure and its interference pattern

图 3(a) 给出按前述条件 1) 拍摄的  $\theta = 10^\circ$  时体心正方结构的俯视图。图 3(b) 是相应的体心正方两个单胞示意图, 旁边的直角坐标系给出了这种单胞轴长的比例。从图 3(a) 可看到, 两种明暗不同的点群分布, 均以方形排列, 暗点分布在四个亮点中心, 反之亦然。亮点与暗点之间的实际距离约为  $3 \sim 4 \mu\text{m}$ 。亮点所代表的波腹点阵面正好处在物镜的焦面上; 而暗点所代表的波腹面处于焦面前一层的波腹内。它们各相应于图 3(b) 两层不同  $xy$  平面内的点群。当显微镜沿  $z$  向作缓慢移动时, 从光屏上会看到原来的亮点逐渐变暗, 而原来的暗点逐渐变亮。当移动一周时, 将会再现亮暗点之间的强度比。这一周期为  $22 \sim 25 \mu\text{m}$ 。所以图 3(a) 相应于显微镜的焦面位于  $z = 0$  的位置。基于以上的实验结果和分析, 作者确信体心正方的图案已形成。其栅格常数为  $a = b = 3 \sim 4 \mu\text{m}, c = 46 \sim 50 \mu\text{m}$ 。而模拟计算给出  $a = b = 3.6 \mu\text{m}, c = 41.6 \mu\text{m}$ 。两组数据的差别主要是由于实验光路中  $\theta$  角偏离确定值所致。

图 4 给出了实验中所拍摄的面心结构的相干图案与相应的晶胞图。图 4(a) 为上述条件 2) 限定下,  $\theta = 10^\circ$  时所拍摄的相干图案。照片中有三种不同亮度的点群。它们各代表三层相继的波腹面的点阵分布。每个亮点都被两种强度不同的 6 个亮点所包围。这 6 个亮点分别为另两层中波腹点的像。每层点与点之间的实际距离为  $4 \sim 5 \mu\text{m}$ 。层与层之间的距离也是相等的, 三层的总厚度约为  $45 \mu\text{m}$ 。这与计算值  $4.2 \mu\text{m}$  和  $41.5 \mu\text{m}$  符合得很好。图 4(b) 给出六方密堆结构的格点分布。 $a, b, c, a$  层代表了该结构的一个周期分布。这种具有三层周期的六方密堆结构就是面心四方。图中画出了由四层中不同格点所构成的一个面心四方单胞。实验中面心结构的



Fig. 4 The face centered structure and its interference pattern

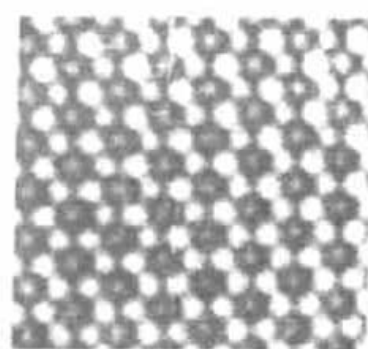
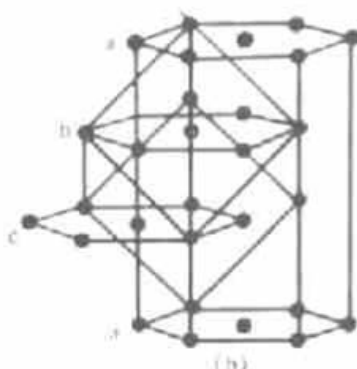


Fig. 5 The interference pattern of face centered structure

栅格常数可从六方密堆结构计算而得。另外,当入射角度变为 $39^\circ$ 时,结构成为面心立方。图5给出 $39^\circ$ 时的相干图象。相应的面心立方的栅格常数约为 $2\ \mu\text{m}$ ,与计算值 $1.6\ \mu\text{m}$ 符合得很好。

总之,此项研究证实了大部分布拉格栅格能用多光束相干的波腹点阵实现。其中重要的结构如面心立方、体心立方、体心正方均能用四束光相干来实现。这对于研制可见光及红外区域的光子晶体是很有意义的。

### 参 考 文 献

- [1] A. Hemmerich, C. Zimmermann, T. W. Hansoh. Multiphoton transition in a spin-polarized 3D optical lattice. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, **72**(5): 625~628
- [2] M. M. Burns, J. M. Fournier, J. A. Golovchenko. Optical matter; crystallization and binding in intense optical fields. *Science*, 1990, **249**(4970): 749~754
- [3] Wei Hu, Hongqiang Li, Bingying Cheng *et al.*. Planar optical lattice of  $\text{TiO}_2$  particles. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(9): 964~966
- [4] E. Yablonovitch, T. J. Gmitter. Photonic band structure; the face-centered-cubic case. *Phys. Rev. Lett.*, 1989, **63**(18): 1950~1953

## The Creation of Bravais Lattices by Multiple Laser Beams

Cheng Bingying Zhang Yi Mei Dongbin Zhang Rong

Li Zhaolin Hu Wei Zhang Daozhong

(Optical Physics Laboratory, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

(Received 28 March 1995; revised 26 June 1995)

**Abstract** We present a computer simulation and an experimental demonstration of the formation of Bravais lattices by multiple laser beams. It is shown that most of the Bravais lattices can be created by four or six laser beams. The body centered, the hexagonal close-packed, and the face centered structures have been specially demonstrated by using a He-Ne laser. The measured lattice constants are coincident well with the calculated values. This study will be helpful to the realization of photonic crystal in visible and infrared region.

**Key words** crystal lattice, interference of multiple laser beam.