

计算机模拟光强与偏振非均匀性对全息干涉结构的影响

吕浩 王守智 王霞*

(青岛科技大学数理学院, 山东 青岛 266061)

摘要 为进一步优化激光全息干涉实验中的光束参数, 获得性质稳定、品质优良的光子结构, 基于多光束干涉理论, 以 2 束和 3 束线偏振光干涉为例, 定量和定性模拟了光强与偏振的非均匀性对全息干涉结构的影响。结果表明, 随着光束偏振角度差值和光强非均匀性的增大, 衬比度呈现递减的趋势, 且光束入射角越大, 这种影响越小。三束光干涉中偏振和光强变化改变光束的波矢差, 从而改变干涉格点形状和衬比度。为全息干涉实验中光强与偏振的控制和调谐提供了理论指导, 可促进光学微结构的制备和优化。

关键词 物理光学; 多光束干涉; 光强; 偏振; 非均匀性; 计算机模拟

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1009001

Influence Study of Inhomogeneous Beam Intensity and Polarization to Holographic Interference Structure by Computer Simulation

Lü Hao Wang Shouzhi Wang Xia

(College of Mathematics and Physics, Qingdao University of Science and Technology,
Qingdao, Shandong 266061, China)

Abstract In order to optimize the beam parameters further of holographic lithography experiment, based on multi-beam interference theory, the influences of inhomogeneous beam intensity and polarization to the interference patterns are simulated by the two and three linear polarization beams interference quantitatively and qualitatively, respectively. Results show that the structure contrast decreases gradually with the increase of beam polarization difference and intensity heterogeneity. Furthermore, this influence diminishes as the incident angle increasing. The variation of beam polarization and intensity in three beam interference influences wave vector difference, and then alters the lattice shape and structure contrast. Theory guidance is provided to control beam polarization and intensity of holographic interference experiments, which paves a way for the fabrication and optimization of optical microstructures.

Key words physical optics; multi-beam interference; beam intensity; polarization; inhomogeneous; computer stimulation

OCIS codes 090.2880; 120.4610; 350.4238; 080.1753

1 引言

光子晶体^[1-2]能够有效调节光子的运动状态被称为类半导体, 它潜在的科学研究和应用前景引起了科学界的关注, 被认为是最有可能替代硅半导体

材料的新型材料, 人们对其理论^[3]、制备技术和应用等方面不断研究并取得了许多进展^[4-6]。目前光子晶体的制备方法主要有精密机械加工^[7]、胶体自组装^[8]、激光全息光刻^[9]、激光直写^[10]等。随着对制

收稿日期: 2014-04-10; 收到修改稿日期: 2014-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(11274189)、山东省高等学校科技计划项目(J14LJ06)

作者简介: 吕浩(1987—), 男, 硕士, 助教, 主要从事光子晶体实验制作、计算机模拟等方面的研究。

E-mail: lvhao_999@163.com

* 通信联系人。E-mail: phxwang@aliyun.com.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

备过程和结果要求的提高,激光全息光刻技术作为一种便捷的微结构制作技术在光子晶体微纳结构及模板制备方面的应用也渐渐凸显。激光全息技术是利用多数相干光会聚干涉形成空间周期变化干涉图案,在光与物质的相互作用下通过光势陷阱捕获微粒,产生不同的微粒空间结构,从而制作各种维度的光子晶体^[11-12]。因其具有制作周期短、制作成本低、高效快捷等优点,在制备一到三维的周期^[13]、准周期^[14]、螺旋^[15]、缺陷模^[16]等多种微纳结构中得到了广泛应用。制备过程中,所得干涉结构是否清晰、均匀,可以通过结构的衬比度反映出来,即干涉最大光强和最小光强之差与之和的比值。由于纯粹的点光源实际中并不存在,而且光源也不是完全的单色光,或是光束的强度、偏振匹配不好,都会导致光束干涉图案的衬比度有所降低或是晶格排布改变,如果衬比度太低,则导致实验结果较难观察与分析。通过计算机定量和定性模拟不同条件下干涉结构衬

比度及光学格点的变化,总结光束非均匀分布下的干涉规律,有利于优化实验过程、提高实验的效率。本文对双光束及三束光干涉中偏振角度和光强改变进行了定量和定性的研究,分析了干涉图案衬比度和干涉格点的变化规律,对光栅结构和二维点阵结构的实验制备具有指导意义。

2 激光全息技术的原理

激光全息光刻的基本原理就是利用多束相干激光在空间干涉,形成稳定的空间周期变化的干涉图案,并将其记录在感光材料上,形成固定的干涉图样。全息干涉结构的形貌与相干激光的入射角度、光强、相位、偏振^[17-18]等参数有关,通过改变这些参数,可以自由调节干涉结构。在实验制作之前,通过计算机模拟分析不同参数对结构的影响尤为重要。

N 束光在交点处的干涉光强的空间分布 $I(\mathbf{r})$ 表达式为^[17]

$$I(\mathbf{r}) = \left[\sum_{j=1}^N \mathbf{E}_j(\mathbf{r}) \exp(i\mathbf{k}_j \cdot \mathbf{r}) \right] \sum_{j=1}^N \mathbf{E}_j^*(\mathbf{r}) \exp(-i\mathbf{k}_j \cdot \mathbf{r}) = N |\mathbf{E}_j|^2 + \sum_{i \neq j}^N \mathbf{E}_i^* \cdot \exp[i(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_j) \cdot \mathbf{r}], \quad (1)$$

$\mathbf{E}_j(\mathbf{r})$ 、 \mathbf{k}_j 分别是第 j 束平面光波的复振幅和波矢。由正、倒易空间傅里叶变换可知,光波矢差与倒格矢是制约联系的。波矢差 $\mathbf{G}_i = \mathbf{k}_i - \mathbf{k}_j$ 就是干涉光强分布结构的倒易空间矢量。由(1)式可知,干涉场光强的空间分布 $I(\mathbf{r})$ 仅决定于波矢差 \mathbf{G}_i 的大小和方向,而光学格点的亮暗对比度与各光束偏振组合 $\mathbf{E}_j - \mathbf{E}_i$ 有关。改变各入射光的波矢 \mathbf{k}_j 的方向,就会引起 $I(\mathbf{r})$ 不同的空间分布,从而可得到不同的空间周期排布。

周围光束与 z 轴的夹角 φ_i 定义为入射角,从原点向光束方向引垂线为该激光束的法线 \hat{n}_i ,而振动方向 \mathbf{E}_i 与法线 \hat{n}_i 的逆时针的夹角 θ_i 定义为偏振角。衬比度反映了干涉结构的清晰程度,计算式为

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (2)$$

式中 I_{\max} 和 I_{\min} 分别为干涉场中光强分布的最大值和最小值。采用干涉条纹的清晰程度来衡量光场的相干程度。即当 $I_{\min} = 0$ 时, $V = 1$, 干涉条纹最清晰,此时干涉光场是完全相干的,两个振幅相同的理想单色点光源所产生的条纹就是这种情况;当 $I_{\max} = I_{\min}$, $V = 0$, 光强呈全明或全暗,无干涉条纹,称光场是完全不相干的;当 $0 < I_{\min} < I_{\max}$ 时, $0 < V < 1$, 能观察到干涉条纹但不是最清晰,称光

场是部分相干的。在实际的干涉光场中是不可能得到 $V = 1$ 的干涉条纹,所以在实验过程要尽可能地在高衬比度条件下进行实验,衬比度越小,越不利于实验的进行。

3 模拟结果与分析

3.1 偏振对双光束线偏光干涉的影响

图 1 是两束线偏振光干涉,偏振角 θ_i 变化的示意图。

图中蓝色水平平面代表 $x-y$ 平面,浅绿色竖直平面代表 $y-z$ 平面,两个平面相互垂直,两束线偏振光在 $y-z$ 平面对顶干涉,会聚于原点,入射角度分别为 φ_1 和 φ_2 (一般两束线偏振光的入射角度相同),深蓝色箭头表示入射的光束,光束的偏振状态用红色箭头表示,为方便的表示偏振角度的变化,将 y 轴上的红色箭头表示为偏振角度的投影。图 1(a)中,两束线偏振光的偏振角都为 0° ,偏振投影都沿 y 轴方向;假设改变其中一束光的偏振,使其偏振角为 θ ,那么该偏振分量在 $x-y$ 平面的投影就不再沿着 y 轴方向,而是 y 轴有一定夹角 θ ,见图 1(b),通过在 y 轴偏振角度的投影可以看到一束光的偏振状态没有变化,而相对的另一束线偏振光的偏振角度改变了 θ 。这样,两束光的偏振在 $x-y$ 平面的投影夹角为 θ 。

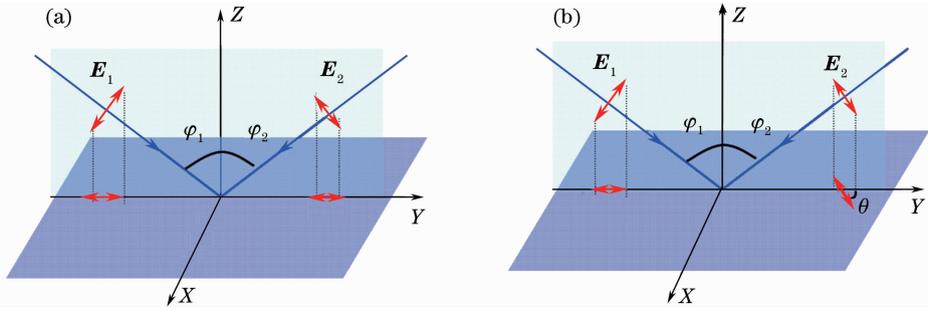


图 1 两束线偏振光偏振角变化示意图

Fig. 1 Schematic of changing polarization angle of two linearly polarized beams

通过改变两束光的偏振组合, 获得了不同偏振下的干涉条纹。图 2 是 $\varphi = 30^\circ$ 时, $\theta_1 = 0^\circ$, θ_2 从 0° 开始以 15° 递增时, 结构变化的趋势图。由图可知, 随着 θ_2 的增大, 明暗条纹的相对宽度发生变化, 光栅结构周期(两相邻明条纹或暗条纹之间的距离)不变。图 2(a) 中 $\theta_1 = \theta_2 = 0^\circ$, 明条纹宽度最大, 图 2(b)~(e) 中 θ_2 分别为 $15^\circ \sim 60^\circ$, 随着单一光束 θ_2 的增加, 明条纹的宽度逐渐变窄, 明暗条纹的衬比度也

越来越小, 图 2(f) 中 θ_2 为 65° , 尚可分辨出明暗条纹, 角度再大时已无法观察到明条纹。从图 2(a)~(c) 可知, 当 θ 变化较小的时候, 明条纹宽度减少的速率较慢, 此时观察到明暗条纹的宽度变化不是特别明显; 当 θ 变化较大时, 进一步观察图 2(d)~(f) 的情况, 发现在相同的偏振变化范围甚至是很小的变化, 明亮条纹的宽度也迅速变窄。

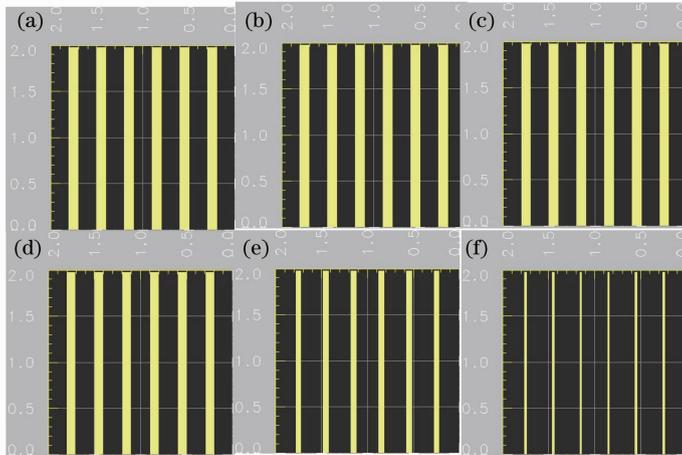


图 2 偏振角 θ 对双光束干涉结果影响示意图

Fig. 2 Double beam interference results influenced by polarization angles θ

表 1 是不同入射角 φ 下, 随着 θ_2 的变化, 干涉场中 I_{\max} 和 I_{\min} 的分布。

表 1 干涉场中光强分布的最大值和最小值

Table 1 I_{\max} and I_{\min} of the interference field

$\theta_2 / (^\circ)$	$\varphi = 10^\circ$		$\varphi = 20^\circ$		$\varphi = 30^\circ$		$\varphi = 40^\circ$	
	I_{\max}	I_{\min}	I_{\max}	I_{\min}	I_{\max}	I_{\min}	I_{\max}	I_{\min}
0	3.88	0.12	3.53	0.47	2.99	1.00	2.35	1.65
15	3.81	0.19	3.48	0.52	2.95	1.04	2.34	1.66
30	3.63	1.13	3.33	0.67	2.86	1.13	2.30	1.70
45	3.32	0.67	3.09	0.91	2.70	1.29	2.25	1.75
60	2.94	1.06	2.77	1.23	2.50	1.50	2.17	1.83
65	2.80	1.20	2.65	1.35	2.42	1.57	2.15	1.85
75	2.49	1.51	2.40	1.60	2.25	1.74	2.09	1.91
90	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00

根据(2)式, 计算了表 1 中不同情况下的衬比度 V , 如表 2 所示。

表 2 不同条件下衬比度分布表

Table 2 V variations with different parameters

$\theta_z / (^\circ)$	$V / (\varphi = 10^\circ)$	$V / (\varphi = 20^\circ)$	$V / (\varphi = 30^\circ)$	$V / (\varphi = 40^\circ)$
0	0.940	0.765	0.500	0.175
15	0.905	0.740	0.479	0.170
30	0.815	0.665	0.433	0.150
45	0.663	0.545	0.410	0.125
60	0.470	0.385	0.250	0.085
65	0.400	0.325	0.210	0.075
75	0.245	0.200	0.123	0.045
90	0	0	0	0

根据表 2 中 V 的变化规律绘制成图 3 所示曲线。从曲线可以清晰看出,偏振角的改变对结构衬比度有重要影响。偏振角度都为 0° 时衬比度最大,此种情况下实验获得的结构是最优化结构,随着偏振角差的增大,衬比度呈现递减的趋势。在偏振角

差值为 45° 附近时出现一个拐点,在拐点之前,衬比度下降速率较缓慢,而在拐点之后,衬比度下降速率明显加快,当两束光偏振角相差 90° 时,两束光不再干涉,衬比度为 0。对比不同曲线,可得光束入射角越小,偏振角对结构衬比度的影响效应越明显。

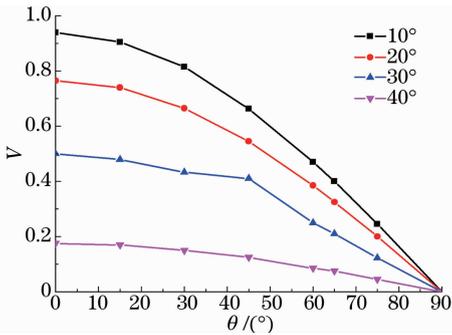


图 3 双光束干涉时不同入射角下衬比度随偏振角增大时的变化。黑、红、蓝、粉色线中, $\varphi = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ 和 40°

Fig. 3 V variations with different polarization angles under different incident angles of two beam interference, while φ is $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ and 40° in black, red, blue and pink line, respectively

3.2 光强对双光束线偏光干涉的影响

偏振的变化实质上影响光束之间干涉的有效光强,在实验中除了偏振的调制和匹配以外,相干光束的自然光强对全息干涉结构的影响同样不可忽视。尤其是在多光束干涉中,不同光束的光强总是会出现大小的差异,研究光强的非均匀分布对结构的影响同样重要^[19]。

以双光束干涉为例,光强增大会导致干涉明暗条纹宽度的变化,如图 4 所示,两束线振偏光中一束光的强度增加,亮条纹宽度随之变宽,如图 4(a)、(b)所示,继续增加光强,亮纹宽度变宽越发明显,而此时,明暗条纹的区分已经不够明显,见图 4(c),如果光强差别再大,则在实验中几乎无法获得可分辨的干涉结构了。

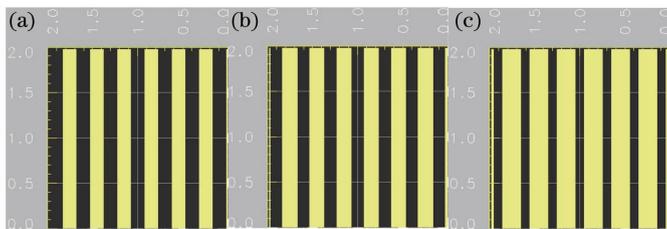


图 4 光强对双光束干涉条纹的影响。(a) 两束光的光强比为 1; (b) 两束光的光强比为 1.1; (c) 两束光的光强比为 1.3

Fig. 4 Influence of beam intensity to two beams interference. (a) Light intensity ratio of two beams is 1; (b) light intensity ratio of two beams is 1.1; (c) light intensity ratio of two beams is 1.3

3.3 偏振对三束光干涉影响

多束光干涉时,干涉项较多且都影响结构的衬比度,为获得最佳衬比度,对各光束偏振态的优化尤为重要,本部分定性分析光束偏振的变化对三束光干涉所得二维格点的影响。如图 5 所示,3 束线偏振光呈伞状均匀分布于 Z 轴的周围,入射角 $\varphi = 45^\circ$,偏振

和光强的变化都会影响结构的衬比度和形状。

由前面的理论可知,干涉场光强的空间分布 $I(\mathbf{r})$ 仅决定于波矢差 \mathbf{G}_i 的大小和方向,三束相干激光仅有两个独立基矢,设为 $\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2$,则 $\mathbf{G}_1 = \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2$, $\mathbf{G}_2 = \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_3$,如图 5 所示。改变光束的偏振角度,则会使 $\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2$ 的大小和夹角都发生变化,直接影响到

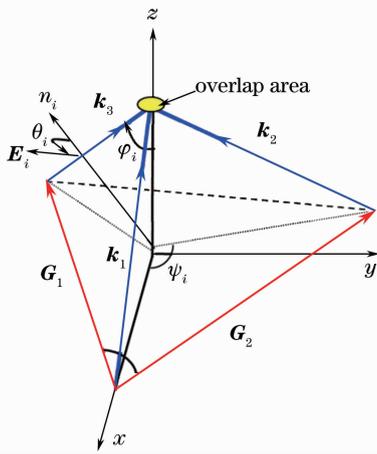


图 5 3 束光干涉示意图

Fig. 5 Diagram of three beams interference

干涉结构的空分布。图 6(a)为各个光束的方位角(光波矢在 x - y 面投影的夹角)都为 120° , 偏振角都为 0° , G_1 、 G_2 之间的夹角为 60° , 产生的干涉结构是二维正六角周期分布。当偏振角度改变为 $(0^\circ, -30^\circ, 30^\circ)$ 组合时, 原来的孔状排布变为柱状排布, 如图 6(b)所示, 进一步改变偏振的组合为 $(0^\circ, 45^\circ, 45^\circ)$ 和 $(30^\circ, 90^\circ, 30^\circ)$, 则干涉结构在倾斜方向上呈波浪型, 且偏振不同, 倾斜方向不同, 分别如图 6(c)、(d)所示。由固体物理的正、倒易空间傅里叶变换可知, 光波矢差与倒格矢是制约联系的。通过改变干涉光束的偏振, 调整各倒格基矢 G_i 的大小及对称形状, 则在正空间中产生晶格变化的点阵结构分布。

3.4 光强对三束光干涉影响

光强的变化同样引起了波矢差 G_i 的大小和方

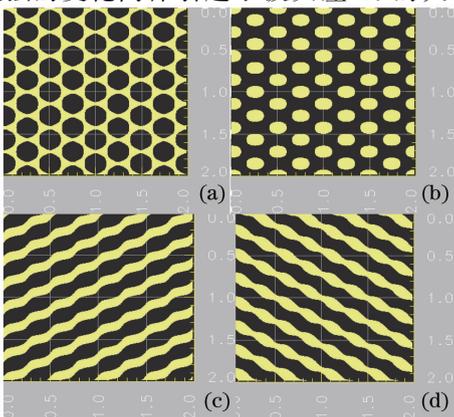


图 6 偏振角对三束线偏振光干涉结构的影响示意图, (a)~(d)中三束光偏振角分别为 $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ $(0^\circ, -30^\circ, 30^\circ)$ $(0^\circ, 45^\circ, 45^\circ)$ $(30^\circ, 90^\circ, 30^\circ)$

Fig. 6 Influence of polarization angles to three beams interference patterns, while the polarization angle from (a) to (d) is $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ $(0^\circ, -30^\circ, 30^\circ)$ $(0^\circ, 45^\circ, 45^\circ)$ $(30^\circ, 90^\circ, 30^\circ)$, respectively

向的变化, 图 7 是三束干涉中光强变化对波矢差的影响。当增大 k_2 的光强时, 改变了 G_2 的大小和方向, 使得两波矢差的夹角发生变化, 从而对于干涉结构产生影响。图 8(a)中各光束光强相同, 干涉结果为正六角分布的圆柱孔, 图 8(b)~(d)分别是把其中一束光的光强增大为原来的 1.3、1.5 和 1.7 倍的情况, 随着光强的增大, 圆柱孔在 y 方向上被压缩变扁, 而 x 方向变化很小, 使整个结构趋于椭圆柱型, 光强增强到 1.5 倍, 圆孔压缩较为严重, 左右长度也展现出一定压缩的迹象, 如图 8(c)所示, 当光强增强到原来的 1.7 倍时, 结构已变形为扁平的椭圆孔。通过改变光强, 可以改变结构在不同方向上的对称性, 从而改变在特定方向上结构的光谱性质。

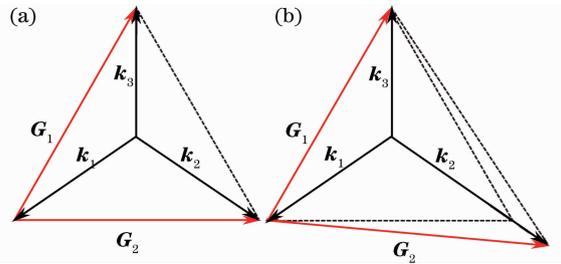


图 7 三束光干涉中光强变化对波矢差的影响。(a) 等光强分布; (b) 一束光强增大

Fig. 7 Influence of beam intensity to wave vector difference of three beams interference. (a) Uniform intensity distribution; (b) non-uniform with one beam intensity enlarging

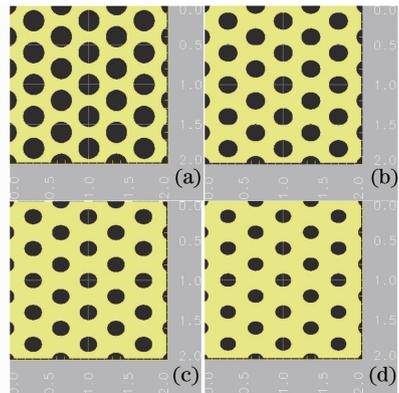


图 8 光强对三束光干涉结果的影响图。(a) 光束光强值均为 1; (b); 光束 k_1 的强度为原来的 1.3; (c) 光束 k_1 的强度为原来的 1.5 倍; (d) 光束 k_1 的强度为原来的 1.7 倍

Fig. 8 Influence of beam intensity to three beams interference patterns. (a) All the beam intensity values are 1; (b) intensity of k_1 is 1.3 times to original; (c) intensity of k_1 is 1.5 times to original; (d) intensity of k_1 is 1.7 times to original

4 结 论

光束的偏振和光强对干涉结构衬比度有很大影响,利用计算机模拟定量分析了双光束干涉中偏振和光强的变化对结构衬比度的影响,发现随着偏振角度差值变大,衬比度呈现递减的趋势,且光束入射角越大,这种影响越小。定性分析了三束光干涉中偏振和光强变化对结构衬比度和点阵结构构型的变化规律,不同的偏振和光强组合影响光束的波矢差,改变干涉格点的形状和衬比度。定量和定性总结了全息干涉中光强和偏振对结构的影响,对这两项参数在实验制备中的优化具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- 1 S John. Strong localization of photons in certain disordered dielectricsuperlattice[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(23): 2486—2489.
- 2 E Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(20): 2059—2061.
- 3 Ai Taotao. Preparation and application of photonic crystals[J]. Laser and Infrared, 2008, 38(7): 633—637.
艾桃桃. 光子晶体的制备方法与应用[J]. 激光与红外, 2008, 38(7): 633—637.
- 4 J Sajeev, F Marian. Photonic bandgap materials: towards an all-optical micro-transistor[J]. J Opt A: Pure Appl Opt, 2001, 3(6): 103—120.
- 5 J Limpert, T Schreiber, S Nolte, *et al.*. The Rising power of fiber lasers and amplifiers[J]. Opt Express, 2003, 11(7): 818—823.
- 6 A Q Liu, A K Asundi. Photonic bandgap crystals: a breakthrough for new generation integrated optical device[C]. SPIE, 2003, 5145: 98—106.
- 7 E Yablonovitch, T Gmitter, K M Leung. Photonic band structure: the face-centered-cubic case employing nonspherical atoms[J]. Phys Rev Lett, 1991, 67(17): 2295—2298.
- 8 X Wang, J Xu, W Y Tam, *et al.*. Realization of optical periodic quasicrystals using holographic lithography[J]. Appl Phys Lett, 2006, 88(5): 051901.
- 9 Y K Pang, J C W Lee, H F Lee, *et al.*. Chiral microstructures (spirals) fabrication by holographic lithography [J]. Opt Express, 2005, 13(19): 7615—7620.
- 10 S S Zhang, Q P Wang, X Y Zhang, *et al.*. Fabrication of holographic 3D polymeric photonic crystals in near-infrared band and the study for optical property[J]. Opto-Electronics Letters, 2008, 19(5): 640—643.
- 11 Lü Hao, Wang Zixia, Ma Jing, *et al.*. Numerical simulation of optical lattice using holographic interference [J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011, 32(2): 216—220.
吕浩, 王自霞, 马静, 等. 激光全息干涉格点的数值模拟[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2011, 32(2): 216—220.
- 12 He Chao, Huang Sujuan, Gu Tingting, *et al.*. Study of optical ring lattice array based on computer-generated holography[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0309003.
- 13 贺超, 黄素娟, 谷婷婷, 等. 基于计算全息的光环晶格阵列研究[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0309003.
- 13 G Zito, B Piccirillo, E Santamato, *et al.*. FDTD analysis of photonic quasicrystals with different tiling geometries and fabrication by single-beam computer-generated holography[J]. J Opt A: Pure Appl Opt, 2009, 11(2): 024007.
- 14 G Zito, B Piccirillo, E Santamato. Two-dimensional photonic quasicrystals by single beam computer-generated holography[J]. Opt Express, 2008, 16(8): 5164—5170.
- 15 M Miyake, Y C Chen, P V Braun, *et al.*. Fabrication of three-dimensional photonic crystals using multi-beam interference lithography and electrodeposition [J]. Adv Mater, 2009, 21: 3012—3015.
- 16 Liu Qineng. Interference theory of the defect mode in one-dimensional doped photonic crystal[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0806001.
刘启能. 以为掺杂光子晶体缺陷模的干涉理论[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0806001.
- 17 Niu Dongjie, Lü Hao, Zhang Qingyue, *et al.*. Study of computer simulation on chiral spiral based on multi-beam holographic lithography[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(s2): s209011.
牛东杰, 吕浩, 张清悦, 等. 基于多光束干涉技术计算机模拟研究手性螺旋结构[J]. 中国激光, 2012, 39(s2): s209011.
- 18 Hu Jie, Qin Yanli, Li Ting. Measuring small displacement of objects by using double-exposure hologram interference field[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(3): 030902.
胡杰, 秦艳利, 李艇. 利用双曝光全息干涉场测物体微小位移[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(3): 030902.
- 19 Han Jian, Bayanheshig, Li Wenhao, *et al.*. Profile revolution of grating masks according to exposure dose and interference fringe contrast in the fabrication of holographic grating[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0305001.
韩建, 巴音贺希格, 李文昊, 等. 全息光栅制作中光栅掩模形状随曝光量及干涉场条纹对比度的变化规律[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0305001.

栏目编辑:何卓铭