

基于非对称入射和偏振调制的四光束干涉光场

彭伏平^{1,2}, 严伟^{1*}, 李凡星^{1,2}, 王思沫^{1,2}, 杜佳林^{1,2}, 杜婧¹

¹中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 四川 成都 610209;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 建立了多光束干涉场的光强分布数学模型, 利用 Matlab 仿真计算了基于方位角、入射角和偏振角联合调制的四光束干涉光场。分析了光束方位角、入射角和偏振态的变化对多光束干涉的影响, 阐释了非对称入射时光场中隔离带现象的生成原因。基于四光束干涉并采用 $s-s-s$ 波的偏振态组合, 使其中一束光的方位角旋转 180° , 并改变入射角, 得到一种可用于制备高长宽比椭圆阵列的方法。实验结果表明, 方位角、入射角和偏振角共同决定了光束的偏振矢量。由于方位角和入射角两个自由度的引入, 非对称入射增加了干涉图案的多样性, 使多光束干涉不仅局限于周期性圆孔阵、圆点阵的制备, 也为制备多周期、跨尺度图案提供了理论参考。

关键词 激光干涉; 非对称入射; 偏振调制; 跨尺度结构

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.192602

Four-Beam Interferometric Light Field Based on Asymmetric Incidence and Polarization Modulation

Peng Fuping^{1,2}, Yan Wei^{1*}, Li Fanxing^{1,2}, Wang Simo^{1,2}, Du Jialin^{1,2}, Du Jing¹

¹State Key Laboratory of Optical Technologies for Microfabrication, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In this paper, a mathematical model of intensity distribution in multi-beam interference field is established, and the four-beam interference light field based on the joint modulation of azimuth angle, incident angle and polarization angle is simulated by Matlab. The influence of changes in beam azimuth angle, incident angle and polarization state on multi-beam interference is analyzed, and the reason for the formation of the isolation band phenomenon in the asymmetric incident light field is explained. Based on the interference of four-beam and the combination of polarization states of $s-s-s$ waves, the azimuth angle of one beam is rotated 180° and the incident angle is changed. A method for fabricating high aspect ratio elliptical array is obtained. Experimental results show that the polarization vector of the beam is determined by the azimuth angle, the incident angle and the polarization angle. Due to the introduction of two degrees of freedom of azimuth and incidence angle, the diversity of interference patterns is increased by asymmetric incidence, which makes the multi-beam interference not only limited to the preparation of periodic circular aperture array and circular dot array, but also provides theoretical reference for the preparation of multi period and trans-scale patterns.

Key words laser interference; asymmetric incidence; polarization modulation; trans-scale structure

OCIS codes 260.3160; 220.4610; 220.3740; 260.5430

1 引言

近年来,微纳结构在微光学和微电子等领域得

到了广泛应用^[1-3],可用于制备微纳结构的技术包括电子束光刻(EBL)^[4]、离子束光刻(IBM)^[5]和激光干涉光刻(LIL)^[6-8]等技术。EBL、IBM 技术可以生成

收稿日期: 2019-12-03; 修回日期: 2020-01-16; 录用日期: 2020-02-19

基金项目: 中科院关键技术创新团队项目(YA17K014)、微电子装备四川青年科技创新团队(J17S006)

* E-mail: yanwei@ioe.ac.cn

高分辨率的任意图案,但存在加工时间长、成本高等问题。LIL 具有成本低、面积大,且不需要精确聚焦等优点,可生产无缺陷、大范围的高阶一维、二维和三维亚波长结构光子晶体^[9-10]。虽然 LIL 技术制备的周期性光致抗蚀剂结构已用于光子波导、光子晶体滤波器、光子晶体光纤、光子晶体隐身材料中^[11-14],但多光束 LIL 技术只能制备周期性结构的特点限制了其应用。

针对现有 LIL 技术存在的问题,人们将多光束 LIL 与相位工程技术结合,通过对入射光的相位进行编码提高干涉图案的多样性^[15-18],但受限与相位调制器的调制精度和效率,很难实现大面积高分辨率图案的制造。非对称入射结合偏振态调制也能增加干涉图案的多样性,相比相位调制器,传统折反射和偏振元件对光场的调控精度更高、稳定性更强,且易操控。吴晓等^[19-20]分析了入射角度偏差对四光束干涉的影响,Voisiat 等^[21]控制三束激光的偏振,在钢表面产生凹坑和柱状周期性结构,Hu 等^[22]通过改变四光束干涉的入射角制备了一维和二维的多尺度结构,Xu 等^[23]调整六光束的入射角和偏振态制备了具有抗反射性能的蛾眼结构。非对称入射条件下每束光的波矢量和光振动矢量均不相同,导致光场分布呈现多样性,同时增加了多光束干涉技术自下而上设计的难度。

本文研究了非对称入射条件下方位角、入射角和偏振角对多光束干涉光场的调制机理,建立了多光束干涉场的数学模型。以四光束干涉为例,详细分析了方位角、入射角和光束偏振态对干涉光场的影响,并进行了仿真验证实验,为基于干涉光场分布反演非对称多光束干涉模型提供了理论参考,同时

仿真得到一种高长宽比的椭圆阵列。

2 非对称入射下的四光束干涉理论

多光束干涉可表示为多个电场矢量的叠加,因此可通过调节每束光的振幅、相位和偏振态以及光束的空间组合方式调控干涉场的光强分布,并用光刻胶记录形成光刻图案。根据麦克斯韦方程和波的叠加原理,当 N 束相干光相互干涉时,干涉光场的光强可表示为

$$I_{N\text{-beam}}(\mathbf{r}) = \sum_{i,j=1}^N E_i(\mathbf{r}) \cdot E_j^*(\mathbf{r}), \quad (1)$$

式中, i, j 分别为第 i 束光和第 j 束光, $E_i(\mathbf{r})$ 和 $E_j^*(\mathbf{r})$ 分别为空间矢量 \mathbf{r} 处第 i 束光的复振幅和第 j 束光的共轭复振幅。采用不同偏振方向的线偏振光进行干涉时,光束的复振幅 $E_i(\mathbf{r})$ 与光束的偏振矢量相关。对于光束振动面 $x'_i-y'_i$ 内与 x'_i 轴(第 i 束光的入射面法线方向,即 s 波方向)夹角为 ϕ 的线偏振光,如图 1 所示,入射光束的复振幅可表示为

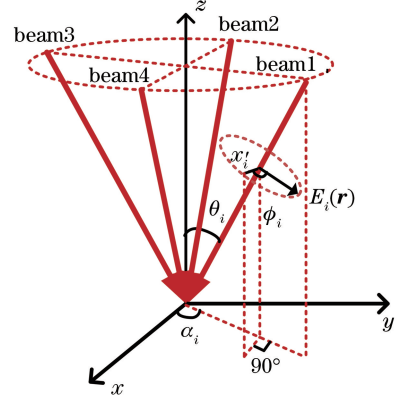


图 1 四光束干涉示意图

Fig. 1 Schematic diagram of four-beam interference

$$E_i(\mathbf{r}) = E_{ix}(\mathbf{r}) + E_{iy}(\mathbf{r}) + E_{iz}(\mathbf{r}) = A_i (e_{ix}\mathbf{i} + e_{iy}\mathbf{j} + e_{iz}\mathbf{k}) \exp[i(\mathbf{k}_i \cdot \mathbf{r} + \varphi_i)] = A_i [(\cos \alpha_i \cos \theta_i \sin \phi_i - \sin \alpha_i \cos \phi_i)\mathbf{i} + (\sin \alpha_i \cos \theta_i \sin \phi_i + \cos \alpha_i \cos \phi_i)\mathbf{j} - (\sin \theta_i \sin \phi_i)\mathbf{k}] \exp[i(\mathbf{k}_i \cdot \mathbf{r} + \varphi_i)], \quad (2)$$

式中, $\mathbf{k}_i = (ik_{ix}, jk_{iy}, kk_{iz}) = k(\mathbf{i} \cos \alpha_i \sin \theta_i, \mathbf{j} \sin \alpha_i \sin \theta_i, -\mathbf{k} \cos \theta_i)$ 为第 i 束光的波矢分量, $E_{ix}(\mathbf{r}), E_{iy}(\mathbf{r}), E_{iz}(\mathbf{r})$ 分别为平面波复振幅在 x, y, z 三个方向上的分量, A_i 为第 i 束光的振幅, $e_{ix}\mathbf{i} + e_{iy}\mathbf{j} + e_{iz}\mathbf{k}$ 为偏振矢量, α_i 为第 i 束光波矢量

入射的方位角, θ_i 为第 i 束光波矢量与 z 轴的夹角, φ_i 为光束初始相位。不同偏振角度的线偏振光相互叠加发生干涉时,忽略光束的初始相位,将光束的复振幅代入(1)式,得到

$$I_{N\text{-beam}}(\mathbf{r}) = N |E_i(\mathbf{r})|^2 + \sum_{i \neq j}^N E_i(\mathbf{r}) \cdot E_j^*(\mathbf{r}) = N |E_i(\mathbf{r})|^2 +$$

$$\sum_{i \neq j}^N (e_{ix} \cdot e_{jx} + e_{iy} \cdot e_{jy} + e_{iz} \cdot e_{jz}) \exp\{-i[(k_{ix} - k_{jx})x + (k_{iy} - k_{jy})y + (k_{iz} - k_{jz})z]\}. \quad (3)$$

式中, k 为光束的波矢大小。为了得到 xy 平面上的干涉光场分布, 将 z 设置为常量。当参与干涉的光束均为单位平面波时, $z=0$ 所在干涉平面的强度可表示为

$$I_{N\text{-beam}}(x, y) = N + 2 \sum_{i < j}^N (e_{ix} \cdot e_{jx} + e_{iy} \cdot e_{jy} + e_{iz} \cdot e_{jz}) \cos[(k_{ix} - k_{jx})x + (k_{iy} - k_{jy})y]. \quad (4)$$

从(4)式可以发现, 多光束干涉的实质是 $N(N-1)/2$ 组不同强度、周期和方向的正弦条纹叠加。如果光束的偏振方向一致, 则 $e_{ix} \cdot e_{jx} +$

$e_{iy} \cdot e_{jy} + e_{iz} \cdot e_{jz} = 1$, 此时可以不考虑光束偏振态对干涉光场的影响, 干涉光场的强度可表示为

$$I_{N\text{-beam}}(x, y) = N + 2 \sum_{i < j}^N \cos\{k[(\cos \alpha_i \sin \theta_i - \cos \alpha_j \sin \theta_j)x + (\sin \alpha_i \sin \theta_i - \sin \alpha_j \sin \theta_j)y]\}. \quad (5)$$

3 非对称入射条件下各参数对四光束干涉光场的影响

根据(5)式可知, 多光束干涉光场受方位角、入射角和偏振角的联合调制, 相比方位角对称分布的等入射角多光束干涉, 非对称入射在方位角和入射角上给予多光束干涉更大的自由度, 使干涉图案具有多样性。以四光束等角对称干涉为例, 从传统四光束干涉光路出发, 改变其中一束光的入射角、方位角。改变光束 1 的入射角 θ_1 , 即入

射角 $\theta_1 \neq \theta_2 = \theta_3 = \theta_4$, 不改变方位角, 如图 2(a) 所示; 改变光束 1 的方位角 α_1 , 如图 2(b) 所示。为研究偏振角变化对非对称入射的影响, 采用两种非对称入射条件, 将光束 1 按图 2(c) 和图 2(d) 中箭头所示方向变化, 即同时改变光束 1 的入射角和方位角。在入射角满足 $\theta_1 \neq \theta_2 = \theta_3 = \theta_4$ 的条件下, 图 2(c) 中的方位角 $\alpha_1 = \alpha_3 = 0, \alpha_2 = \pi/2, \alpha_4 = 3\pi/2$, 图 2(d) 中的方位角 $\alpha_1 = \alpha_3 = 0, \alpha_2 = 2\pi/3, \alpha_4 = 4\pi/3$ 。

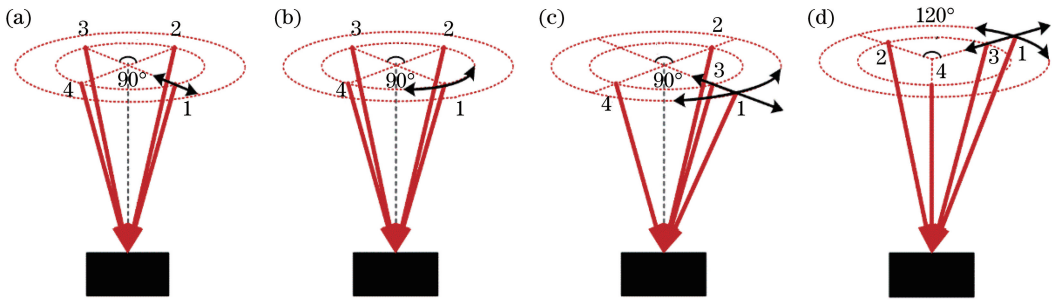


图 2 四光束非对称入射图。(a) 改变入射角; (b) 改变方位角; (c)~(d) 同时改变入射角和方位角

Fig. 2 Asymmetric incidence pattern of four-beam. (a) Change the incidence angle; (b) change the azimuth angle; (c)~(d) change the incident angle and azimuth at the same time

3.1 入射角对四光束干涉光场的调制

只改变光束 1 的入射角时, 由(5)式可得到图 2(a) 中干涉光场的光强, 可表示为

$$I(x, y) = 4 + 4\cos[k(\sin \theta_1)x] \cos[k(\sin \theta)y] + 2\cos[k(\sin \theta_1 + \sin \theta)x] + 2\cos[k(2\sin \theta)y] + 2\cos[k(\sin \theta)(x + y)] + 2\cos[k(\sin \theta)(x - y)], \quad (6)$$

式中, 第一项为背景强度, 第三、四项分别为 x 、 y 方向上不同周期的两组干涉条纹, 第五、六项分别为 $\pm 45^\circ$ 方向上相同周期的两组干涉条纹, 四组条纹叠

加后形成的周期性点阵图案受第二项调制函数的调制, 得到最终的干涉场。对于四光束干涉, 改变光束 1 的入射角时, 该方向的条纹和调制函数周期会发生变化。 θ_1 分别取 $25^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, \theta_2 = \theta_3 = \theta_4 = 30^\circ$ 时, 四光束仿真得到的干涉光场光强分布如图 3 所示, 其中, λ 为激光的波长。

从图 3 中可以发现, 干涉图案出现了隔离带, 原因是存在第二项调制函数, 隔离带的周期 $T = \lambda / |\sin \theta_1 - \sin \theta|$, 其中, θ 为其他三束光的入射角。单个周期内四边形点阵是四组条纹干涉叠加

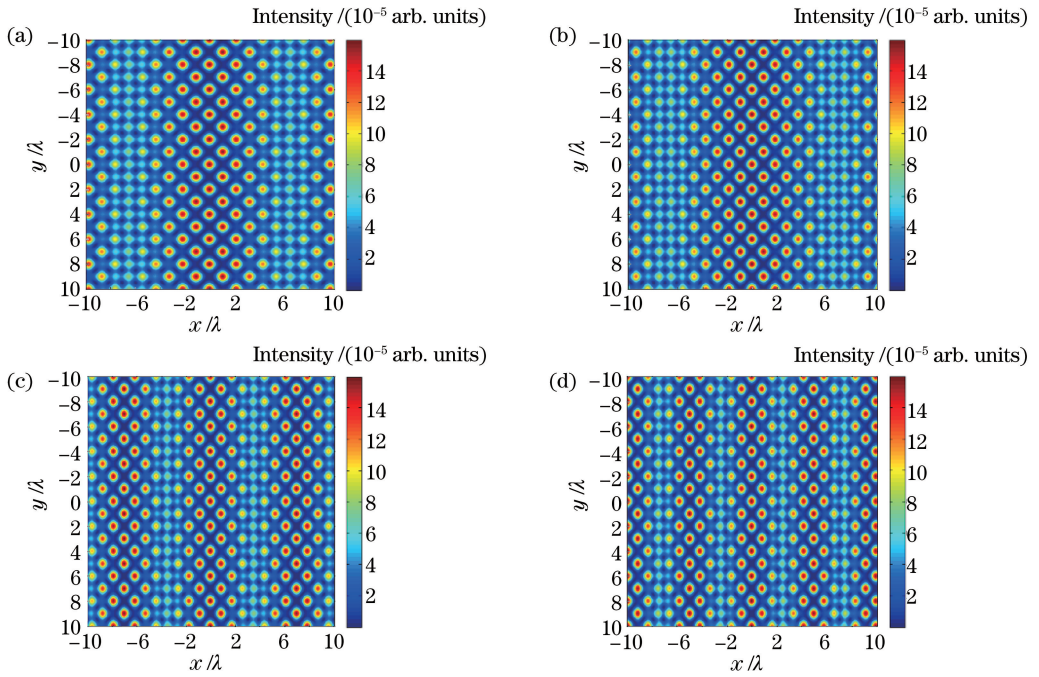


图 3 不同光束 1 入射角得到的干涉光场。(a) $\theta_1 = 25^\circ$; (b) $\theta_1 = 35^\circ$; (c) $\theta_1 = 40^\circ$; (d) $\theta_1 = 45^\circ$

Fig. 3 Interference light field obtained at different incident angles of beam 1. (a) $\theta_1 = 25^\circ$; (b) $\theta_1 = 35^\circ$; (c) $\theta_1 = 40^\circ$; (d) $\theta_1 = 45^\circ$

的结果,对比图 3(a)~图 3(d)可知,四边形点阵和隔离带的宽度随入射角差值 $|\theta_1 - \theta|$ 的增大而减小。由入射角变化形成的非对称四光束干涉会引入一个调制函数,该调制函数直接导致了干涉图案中产生隔离带,入射角 θ_1 和 θ 的大小直接决定了隔离

带的周期和单元图案中各方向的周期大小。

3.2 方位角对四光束干涉光场的调制

为了研究方位角的变化对四光束干涉光场的影响,按图 2(b)改变光束 1 的方位角 α_1 ,由(5)式得到随方位角 α_1 变化的四光束干涉场的场强,可表示为

$$I(x, y) = 4 + 2\cos(ky) + 2\cos[k(\sin\theta)(x+y)] + 2\cos[k(\sin\theta)(x-y)] + 2\cos\{k(\sin\theta)[(\cos\alpha_1 + 1)x + (\sin\alpha_1)y]\} + 4\cos\{k(\sin\theta)[(\cos\alpha_1)x + (\sin\alpha_1)y]\}。 \quad (7)$$

由(7)式可以看出,干涉场由背景光和五组双光束干涉条纹叠加而成,五组条纹对应的斜率分别为 $0, \pm 1, -\frac{1 + \cos\alpha_1}{\sin\alpha_1}, -\cot\alpha_1$, 五组条纹的光强极大值有四组为 2,还有一组为 4。方位角主要影响其中两组条纹的斜率,令四光束的入射角均为 30° , α_1 分别取 $\pi/6, 5\pi/12, \pi/2, \pi$ 时,得到的干涉图案如图 4 所示。

从图 4 可以发现,光束 1 与光束 2、3、4 不重合时,会出现隔离带现象,但与单光束入射角变化产生的隔离带有本质区别。与入射角变化时引入调制函数产生的隔离带不同,方位角变化产生的隔离带随方位角的变化而旋转,原因是参与叠加的五组条纹中有两组条纹的斜率随方位角的变化而变化。光束 1 与光束 2、光束 3 分别重合时,干涉

光场均为四边形光强极大值点阵分布,但改变条纹斜率会使光场极大值发生轻微畸变,隔离带的消失也证明了方位角对光场的调制不同于入射角对光场的调制。

3.3 偏振角对四光束干涉光场的调制

对于真空中传播的电磁波,光矢量的振动平面始终与传播方向垂直,且传播方向上没有电场分量。因此,对于四光束离轴干涉,不存在四光束偏振方向完全一致的情况,即实际情况中各光束相同方向的振动分量会发生干涉,多光束干涉是多组同振动方向的分量发生干涉得到的条纹叠加。由(3)式可知,偏振角会影响每组条纹强度的极值,条纹强度由参与干涉的两束光偏振矢量共同决定。表 1 为不同方位角下的 s 波和 p 波在 x, y, z 三个方向上的偏振矢量。

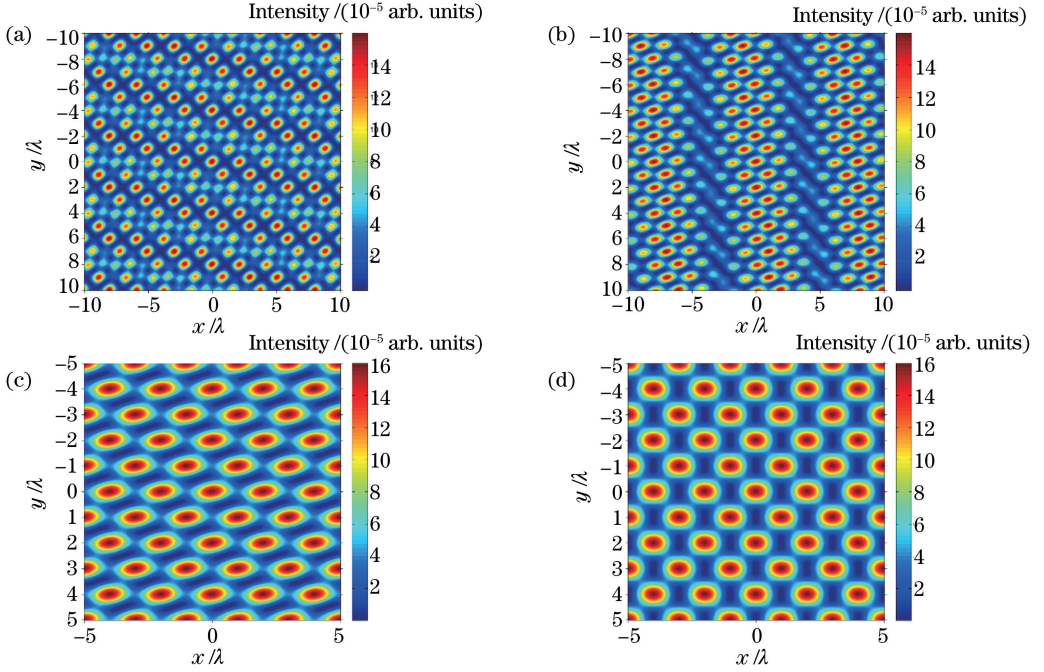


图 4 不同光束 1 方位角得到的干涉光场。(a) $\alpha_1 = \pi/6$; (b) $\alpha_1 = 5\pi/12$; (c) $\alpha_1 = \pi/2$; (d) $\alpha_1 = \pi$
 Fig. 4 Interference light field obtained at different azimuth angle of the beam1. (a) $\alpha_1 = \pi/6$;

(b) $\alpha_1 = 5\pi/12$; (c) $\alpha_1 = \pi/2$; (d) $\alpha_1 = \pi$

表 1 不同方位角下 s 波和 p 波对应的偏振矢量

Table 1 Polarization vector corresponding to s -wave and p -wave under different azimuth angles

Beam parameter	Azimuth angle / rad		Polarization angle / rad	
	α		$\varphi=0(s\text{-wave})$	$\varphi=\pi/2(p\text{-wave})$
Polarization vector	0		$(0, 1, 0)$	$(\cos \theta, 0, \sin \theta)$
	$\pi/2$		$(-1, 0, 0)$	$(0, \cos \theta, -\sin \theta)$
	π		$(0, -1, 0)$	$(-\cos \theta, 0, -\sin \theta)$
	$3\pi/2$		$(1, 0, 0)$	$(0, -\cos \theta, -\sin \theta)$
	$\pi/3$		$(-\sqrt{3}/2, 1/2, 0)$	$(1/2\cos \theta, \sqrt{3}/2\cos \theta, -\sin \theta)$
	$2\pi/3$		$(-\sqrt{3}/2, -1/2, 0)$	$(-1/2\cos \theta, \sqrt{3}/2\cos \theta, -\sin \theta)$
	$4\pi/3$		$(\sqrt{3}/2, -1/2, 0)$	$(1/2\cos \theta, -\sqrt{3}/2\cos \theta, -\sin \theta)$

在图 2(c)和图 2(d)中,四光束分别以 s - s - s - s 波和 s - p - s - p 波的方式组合入射,入射角 $\theta_1 = 35^\circ$, $\theta_2 = \theta_3 = \theta_4 = 30^\circ$, 仿真得到的干涉场如图 5 所示。可以发现,四光束的方位角和入射角均相等,但在不同的偏振矢量组合下,得到的干涉光场完全不同。尽管光束没有重合,图 2(c)中采用 s - s - s - s 波得到的干涉场没有出现隔离带,这表明偏振角决定了干涉场的光强分布。在图 2(d)中采用 s - p - s - p 波和 s - s - s - s 波得到的干涉场在带状内出现了光强互补现象,原因是 s - p - s - p 波入射时生成六边形极大值点阵, s - s - s - s 波入射时生成六边形极小值点阵。同时,偏振矢量决定了干涉场中每组条纹的极值,因此,采取不同的偏振组合入射时,得到的干涉图案极大值和干涉光场的对比度也不同。

图 5(b)为在图 2(c)入射条件下,采用 s - s - s - s 波入射得到的椭圆光场阵列光强,可表示为

$$I(x, y) = 4 + 2\cos[k(\sin \theta_1 - \sin \theta)x] - 2\cos[k(2\sin \theta)y]. \quad (8)$$

可以发现,椭圆阵列由 x 方向周期为 $T_x = \lambda / |\sin \theta_1 - \sin \theta|$ 的条纹和 y 方向周期为 $T_y = \lambda / 2\sin \theta$ 的条纹叠加而成,可将椭圆的长宽比 R 表示为

$$R = \frac{T_x}{T_y} = \frac{2\sin \theta}{|\sin \theta_1 - \sin \theta|}. \quad (9)$$

由(8)式和(9)式可知,光束 2, 3, 4 的入射角 θ 决定了干涉图案单元的尺度,而光束 1 的入射角 θ_1 与另外三束光入射角 θ 的差值决定椭圆图形的长宽比。可通过选取合适的入射角 θ_1 和 θ , 得到从 μm

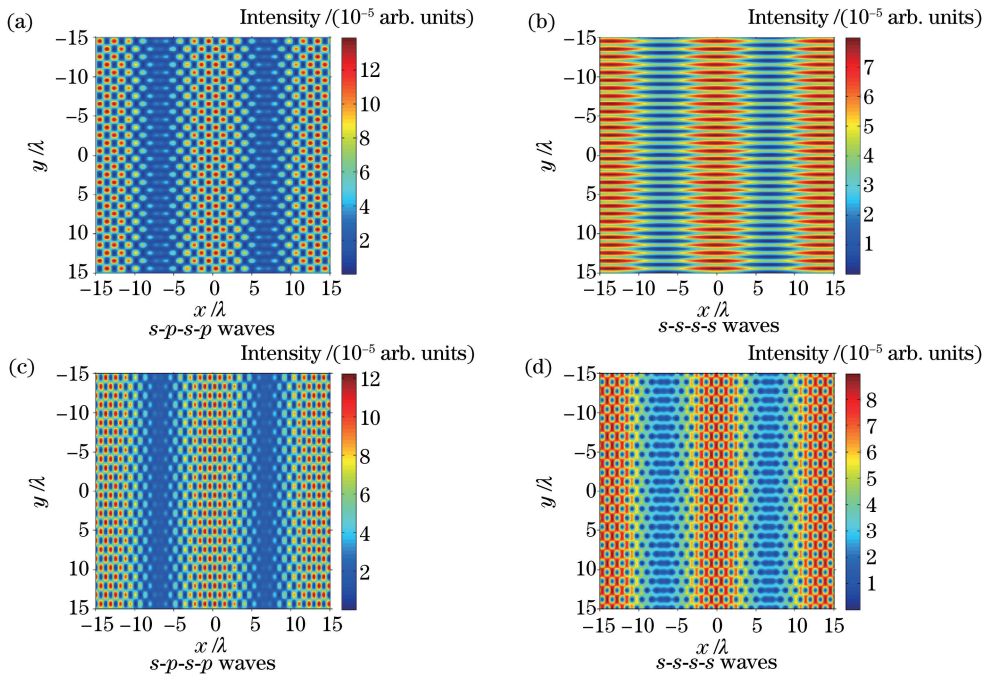


图5 非对称入射时偏振对干涉光场的影响。(a)带状四边形点阵;(b)椭圆点阵;
(c)带状六边形光强极大值点阵;(d)带状六边形光强极小值点阵

Fig. 5 Influence of polarization on the interference light field in asymmetric incidence. (a) Ribbon quadrilateral lattice; (b) elliptical lattice; (c) maximum light intensity lattice of the ribbon hexagon; (d) minimum light intensity lattice of the ribbon hexagon

级到 ns 级的椭圆阵列,与对称入射四光束干涉得到的二维椭圆阵列相比,本方法可用于制备高长宽比的椭圆孔或椭圆柱阵列。

4 结 论

基于多光束干涉理论模型,通过调制四光束干涉中的一束入射光研究了非对称入射时方位角、入射角和光束偏振态对多光束干涉的影响。仿真结果表明,多光束干涉可看作多组不同强度、方向和周期的双光束干涉条纹的叠加。入射角和方位角变化引发的非对称入射均会使干涉光场出现隔离带,但二者的影响机制略有不同。光束的偏振角结合入射角和方位角决定了每组干涉条纹的强度,仿真了 $s-s-s-s$ 波和 $s-p-s-p$ 波的非对称四光束干涉光场,结果表明,在光束 1 和光束 3 方位角相同的条件下,采用 $s-s-s-s$ 波可生成高长宽比的椭圆阵列。表明在非对称入射条件下,选取合理的方位角、入射角和偏振角组合,可得到多周期跨尺度图案,这极大拓展了多光束干涉的应用范围。

参 考 文 献

[1] Burrow G M, Gaylord T K. Multi-beam interference advances and applications: nano-electronics, photonic

crystals, metamaterials, subwavelength structures, optical trapping, and biomedical structures [J]. *Micromachines*, 2011, 2(2): 221-257.

- [2] Wang L, Wang Z H, Yu Y H, et al. Laser interference fabrication of large-area functional periodic structure surface[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2018, 13(4): 493-503.
- [3] Hutton D M. Silicon earth: introduction to the microelectronics and nanotechnology revolution [J]. *Kybernetes*, 2011, 40(5/6): 934-936.
- [4] Chen A, Chua S J, Chen P, et al. Fabrication of sub-100 nm patterns in SiO_2 templates by electron-beam lithography for the growth of periodic III-V semiconductor nanostructures [J]. *Nanotechnology*, 2006, 17(15): 3903-3908.
- [5] Xu X S, Chen H D, Xiong Z G, et al. Fabrication of photonic crystals on several kinds of semiconductor materials by using focused-ion beam method [J]. *Thin Solid Films*, 2007, 515(22): 8297-8300.
- [6] Xia D Y, Ku Z, Lee S C, et al. Nanostructures and functional materials fabricated by interferometric lithography [J]. *Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla.)*, 2011, 23(2): 147-179.
- [7] Vala M, Homola J. Flexible method based on four-beam interference lithography for fabrication of large

- areas of perfectly periodic plasmonic arrays [J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 18778-18789.
- [8] Wang K, Jin Y, Liu Y W, et al. Preparation and characterization of multi-morphological and multi-periodical micro-nano composite structures [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(12): 120501.
王康, 金玉, 刘昱玮, 等. 多形貌多周期微纳米复合结构的制备及表征[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(12): 120501.
- [9] Zhang W, Liu W P, Gu X Y, et al. Multi-beam laser interference lithography pattern [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(12): 3157-3162.
张伟, 刘维萍, 顾小勇, 等. 多光束激光干涉光刻图样[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(12): 3157-3162.
- [10] Lutkenhaus J, George D, Garrett D, et al. Holographic formation of compound photonic crystal and nano-antenna templates through laser interference [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(10): 103103.
- [11] Sakakura M, Sawano T, Shimotsuma Y, et al. Fabrication of three-dimensional 1×4 splitter waveguides inside a glass substrate with spatially phase modulated laser beam [J]. *Optics Express*, 2010, 18(12): 12136-12143.
- [12] Yuan L L, Herman P R. Laser scanning holographic lithography for flexible 3D fabrication of multi-scale integrated nano-structures and optical biosensors[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 22294.
- [13] Zhao L, Wang Z, Zhang J, et al. Antireflection silicon structures with hydrophobic property fabricated by three-beam laser interference [J]. *Applied Surface Science*, 2015, 346: 574-579.
- [14] Yan Y W, An J M, Zhang J S, et al. Chip of phase control arrays based on silica on silicon [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(4): 0423001.
颜跃武, 安俊明, 张家顺, 等. 硅基二氧化硅波导阵列相位控制芯片[J]. *光子学报*, 2019, 48(4): 0423001.
- [15] Kumar M, Joseph J. Digitally reconfigurable complex two-dimensional dual-lattice structure by optical phase engineering[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(7): 1333-1338.
- [16] Lutkenhaus J, George D, Moazzezi M, et al. Digitally tunable holographic lithography using a spatial light modulator as a programmable phase mask[J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 26227-26235.
- [17] Hassan S, Sale O, Lowell D, et al. Holographic fabrication and optical property of graded photonic super-crystals with a rectangular unit super-cell[J]. *Photonics*, 2018, 5(4): 34.
- [18] Behera S, Kumar M, Joseph J. Submicrometer photonic structure fabrication by phase spatial-light-modulator-based interference lithography[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(8): 1893-1896.
- [19] Wu X. Influence of interference deviation on four-beam interference with circular polarization [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(6): 061405.
吴晓. 干涉偏差对四束圆偏振光干涉的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(6): 061405.
- [20] Ma L N, Zhang J, Jiang S L, et al. Influence on patterns quality of multi-beam interference lithography caused by the deviations of incidence azimuth angle and intensity of light [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(10): 1011003.
马丽娜, 张锦, 蒋世磊, 等. 入射光束角度及强度偏差对多光束干涉光刻结果的影响[J]. *光子学报*, 2015, 44(10): 1011003.
- [21] Voisiat B, Zwahr C, Lasagni A F. Growth of regular micro-pillar arrays on steel by polarization-controlled laser interference patterning [J]. *Applied Surface Science*, 2019, 471: 1065-1071.
- [22] Hu Y W, Wang Z B, Weng Z K, et al. Bio-inspired hierarchical patterning of silicon by laser interference lithography [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(12): 3226-3232.
- [23] Xu J, Wang Z B, Zhang Z A, et al. Fabrication of moth-eye structures on silicon by direct six-beam laser interference lithography[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 115(20): 203101.