

增强型相位光栅衍射效率研究

杨光华^{1,2}, 王宇^{1,2}, 李璟^{1,2*}, 齐月静^{1,2}, 丁敏侠¹¹中国科学院微电子研究所, 北京 100029;²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了提高相位光栅位置测量系统的测量精度,需要降低零级和偶衍射级次信号的衍射效率,同时提高高奇衍射级次信号的衍射效率。目前,已知的增强型相位光栅衍射效率模型限制了结构参数取值范围,在设计时以一高奇衍射级次信号作为优化目标。为设计针对多个高奇衍射级次信号的衍射增强、零级和偶衍射级次缺级的相位光栅结构,对增强型相位光栅衍射效率进行了深入研究。该研究基于标量衍射理论,建立相位光栅结构与衍射效率理论模型;分析光栅结构参数如槽深、栅脊宽度、栅脊位置对衍射效率的影响;根据相位光栅位置测量系统的约束条件,获得多奇衍射级次增强型光栅结构。这种结构不仅使零级和偶衍射级次缺级,而且同时提高了第 5、7、9 衍射级次的衍射效率。本研究有利于深入理解增强型相位光栅衍射原理,为光栅设计提供支撑。

关键词 衍射; 相位光栅; 衍射效率; 位置测量系统

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1205001

Diffraction Efficiency of Enhanced Phase Grating

Yang Guanghua^{1,2}, Wang Yu^{1,2}, Li Jing^{1,2*}, Qi Yuejing^{1,2}, Ding Minxia¹¹ Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to improve the measurement accuracy of a phase grating position measurement system, it is necessary to reduce the diffraction efficiency of diffraction signals of the zero order and even diffraction orders, and enhance the diffraction efficiency of high odd order diffraction signals. At present, the known diffraction efficiency model of enhanced phase gratings restricts the range of values of the structural parameters. A special high odd order diffraction signal is used as the optimized target in the design. Therefore, in order to design the phase grating structure with diffraction enhancement and zero and even order diffraction missing for multiple high odd order diffraction signals, the diffraction efficiency of the enhanced phase grating is deeply studied. In this work, based on the scalar diffraction theory, the theoretical models of the phase grating structure and diffraction efficiency are established; the influences of grating structure parameters such as groove depth, grating ridge width, and grating ridge position on diffraction efficiency are analyzed. According to the constraints of phase grating position measurement system, the enhanced grating structure with multiple odd diffraction orders is obtained. This kind of structure not only makes the zero and even order diffraction missing, but also improves the diffraction efficiency of the 5th, 7th, and 9th order diffraction. This study is helpful to understand the diffraction principle of the enhanced phase grating and provides support for grating design.

Key words diffraction; phase grating; diffraction efficiency; position measurement system

OCIS codes 050.1950; 050.1940; 050.1960; 230.1950

1 引言

相位光栅位置测量技术具有测量精度高、受环

境影响较小的特点,广泛应用于集成电路、精密加工以及精密测量领域^[1],其原理为:入射光束照射相位光栅,生成各级衍射光束,通过提取衍射光束中的相

收稿日期: 2020-12-03; 修回日期: 2021-01-12; 录用日期: 2021-01-18

* E-mail: lijing2018@ime.ac.cn

位信息获得光栅位置信息^[2]。随着集成电路领域中技术节点的不断缩小,实际应用中光栅位置传感器的测量精度提出更高的要求^[3-6]。

相位光栅位置测量传感器的测量精度与衍射级次有关。衍射级次越高,测量精度也越高。通常传感器可以收集 9 级衍射光束,并用奇衍射级次信号生成测量信号。其中,低奇衍射级次信号如第 1、3 衍射级信号用于扩大测量范围;高奇衍射级次信号如第 5、7、9 衍射级信号用于提高测量精度^[7-9]。然而,对于标准型相位光栅,衍射级次越高,则衍射效率越低,如 ASML 公司的标准型相位光栅 AH11^[10-11]。因此,为了提高高衍射级次的衍射效率,人们提出了增强型相位光栅结构^[12-16],通过细分标准型相位光栅结构提高某一高奇衍射级次信号的衍射效率。然而,增强型光栅结构不仅提高了某一奇衍射级次信号的衍射效率,同时也导致了零级和偶衍射级次信号的增强,如 ASML 公司的第 5 衍射级次增强的 AH53^[8]。零级和偶衍射级次信号作为杂散光的主要来源,不仅降低了测量信号的信噪比,同时也影响测量信号的对比度。虽然通过偏振分离、光阑遮挡等方式可以减小零级和偶衍射级次信号的影响^[7-8,15,17],但是这些方法需重新设计位置测量传感器。因此,通过光栅设计,一方面可提高高奇衍射级次信号的衍射效率,另一方面可降低零级光和偶衍射级次信号的衍射效率,这成为一种有效且经济的手段。目前,已知的增强型相位光栅衍射效

率模型限制了结构参数的取值范围,并且在设计增强型相位光栅结构时以某一高奇衍射级次信号作为优化目标,没有同时增强多个高奇衍射级次信号^[18-20]。因此,需对增强型相位光栅的衍射效率进行深入分析,以为光栅设计提供理论支撑。

本文建立增强型相位光栅结构与衍射效率之间的理论模型;详细分析槽深、栅脊宽度和位置对衍射效率的影响;根据相位光栅位置测量系统的相关约束,设计增强多个高奇衍射级次信号的光栅结构 IME3 和 IME5,最后通过严格耦合波(RCWA)方法进行验证。

2 理论模型

在相位光栅位置测量系统中,一个周期内栅脊个数 $N=1$ 的相位光栅被称为标准型相位光栅^[12],如图 1(a)所示。其中, d 为光栅周期, h 为槽深, f 为占空比,定义为栅脊宽度和周期之比。占空比 $f=0.5$ 的标准型相位光栅结构被称为 AH11。一个周期内栅脊个数 $N>1$ 的相位光栅被称为细分型相位光栅,如图 1(b)所示。若该光栅结构可增强第 m 衍射级次信号,则称该结构为第 m 衍射级次增强型相位光栅^[12]。其中 $l_i = f_i d$ 为第 i 个栅脊的宽度, f_i 为各个栅脊的占空比, x_i 为第 i 个栅脊的中心位置, Δx_i 为第 i 个栅脊和第 $i+1$ 个栅脊的距离, $f = \sum_{i=1}^N f_i$ 为占空比。

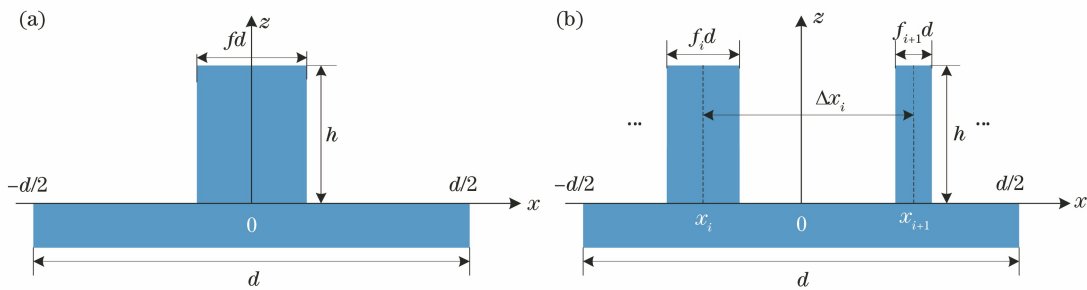


图 1 相位光栅结构。(a)标准型相位光栅结构;(b)细分型相位光栅结构

Fig. 1 Structures of phase grating. (a) Structure of standard phase grating; (b) structure of segmented phase grating

假设细分型相位光栅沿 y 轴无限延伸, x 方向包含无数个周期,且每个周期有两个栅脊,分别为第

i 个栅脊和第 $i+1$ 个栅脊。建立如图 1(b)所示的坐标系,则该光栅结构可表示为

$$z(x) = \begin{cases} 0, & -d/2 + nd \leq x \leq x_i - f_i d/2 + nd \\ h, & x_i - f_i d/2 + nd < x \leq x_i + f_i d/2 + nd \\ 0, & x_i + f_i d/2 + nd < x \leq x_{i+1} - f_{i+1} d/2 + nd \\ h, & x_{i+1} - f_{i+1} d/2 + nd < x \leq x_{i+1} + f_{i+1} d/2 + nd \\ 0, & x_{i+1} + f_{i+1} d/2 + nd < x \leq d/2 + nd \end{cases}, \quad (1)$$

式中: n 为整数。假设波长为 λ 的平面波垂直入射光栅, 则该光栅的反射函数 $R(x)$ 为

$$R(x) = \begin{cases} r, & -d/2 + nd \leq x \leq x_i - f_i d/2 + nd \\ r \exp\left(-j \frac{4\pi h}{\lambda}\right), & x_i - f_i d/2 + nd < x \leq x_i + f_i d/2 + nd \\ r, & x_i + f_i d/2 + nd < x \leq x_{i+1} - f_{i+1} d/2 + nd \\ r \exp\left(-j \frac{4\pi h}{\lambda}\right), & x_{i+1} - f_{i+1} d/2 + nd < x \leq x_{i+1} + f_{i+1} d/2 + nd \\ r, & x_{i+1} - f_{i+1} d/2 + nd < x \leq d/2 + nd \end{cases}, \quad (2)$$

式中: r 为光栅材料的反射系数, 为了便于推导以及仿真, 这里设 r 为 1。假设入射平面波振幅 $A_0 = 1$, 经光栅衍射后, 根据标量衍射理论, 各衍射级次的衍射场为

$$U_m = \frac{A_0}{d} \int_{-d/2}^{d/2} R(x) \exp\left(-j \frac{2m\pi}{d} x\right) dx, \quad (3)$$

式中: U_m 为增强型相位光栅的衍射场, 下标 m 表示第 m 阶衍射级次, m 为整数。将(2)式代入(3)式

可得

$$U_m = U_{(m,i)} + U_{(m,i+1)} - \frac{1}{d} \int_{-d/2}^{d/2} \exp\left(-j \frac{2m\pi}{d} x\right) dx = \begin{cases} U_{(m,i)} + U_{(m,i+1)} - 1, & m = 0 \\ U_{(m,i)} + U_{(m,i+1)}, & m = \pm 1, \pm 2 \dots \end{cases}, \quad (4)$$

式中: $U_{(m,i)}$ 、 $U_{(m,i+1)}$ 分别为由第 i 个、第 $i+1$ 个栅脊组成的标准相位光栅的第 m 衍射级次的衍射场, 计算公式分别为

$$U_{(m,i)} = \frac{1}{d} \left[\int_{-d/2}^{x_i - f_i d/2} \exp\left(-j \frac{2m\pi}{d} x\right) dx + \int_{x_i - f_i d/2}^{x_i + f_i d/2} \exp\left(-j \frac{4\pi h}{\lambda}\right) \exp\left(-j \frac{2m\pi}{d} x\right) dx + \int_{x_i + f_i d/2}^{d/2} \exp\left(-j \frac{2m\pi}{d} x\right) dx \right], \quad (5)$$

$$U_{(m,i+1)} = \frac{1}{d} \left[\int_{-d/2}^{x_{i+1} - f_{i+1} d/2} \exp\left(-j \frac{2m\pi}{d} x\right) dx + \int_{x_{i+1} - f_{i+1} d/2}^{x_{i+1} + f_{i+1} d/2} \exp\left(-j \frac{4\pi h}{\lambda}\right) \exp\left(-j \frac{2m\pi}{d} x\right) dx + \int_{x_{i+1} + f_{i+1} d/2}^{d/2} \exp\left(-j \frac{2m\pi}{d} x\right) dx \right]. \quad (6)$$

将(5)、(6)式统一化简为

$$U_{(m,k)} = \begin{cases} 1 + f_k \left[\exp\left(-j \frac{4\pi h}{\lambda}\right) - 1 \right], & m = 0 \\ \frac{\sin(m\pi f_k)}{m\pi} \left[\exp\left(-j \frac{4\pi h}{\lambda}\right) - 1 \right] \exp\left(-j \frac{2m\pi}{d} x_k\right), & m = \pm 1, \pm 2 \dots \end{cases}, \quad (7)$$

式中: f_k 为第 k 个栅脊的占空比; x_k 为第 k 个栅脊的中心位置; $k = i, i+1$ 。因此, 当栅脊个数为 N ,

其中 $N \geq 1$ 时, 由(4)式可知, 衍射场 U_m 为

$$U_m = \begin{cases} \sum_{i=1}^N U_{(m,i)} - (N-1), & m = 0 \\ \sum_{i=1}^N U_{(m,i)}, & m = \pm 1, \pm 2 \dots \end{cases}. \quad (8)$$

将(7)式代入(8)式, 可得一个周期内 N 个栅脊的相位光栅衍射场为

$$U_m(h, f_i, x_i, N) = \begin{cases} 1 + \sum_{i=1}^N \left[f_i \exp\left(-j \frac{4\pi h}{\lambda}\right) - f_i \right], & m = 0 \\ \sum_{i=1}^N \frac{\sin(m\pi f_i)}{m\pi} \left[\exp\left(-j \frac{4\pi h}{\lambda}\right) - 1 \right] \exp\left(-j \frac{2m\pi}{d} x_i\right), & m = \pm 1, \pm 2 \dots \end{cases}. \quad (9)$$

因此,一个周期内 N 个栅脊的相位光栅的衍射效率为

$$\eta_m(h, f_i, x_i, N) = \begin{cases} 1 - 4\sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda}h\right) \left(1 - \sum_{i=1}^N f_i\right) \sum_{i=1}^N f_i, & m = 0 \\ \frac{4}{(m\pi)^2} \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda}h\right) \left| \sum_{i=1}^N \sin(m\pi f_i) \exp\left(-j\frac{2m\pi}{d}x_i\right) \right|^2, & m = \pm 1, \pm 2 \dots \end{cases} \quad (10)$$

3 分析与讨论

根据第 2 节中建立的理论模型,以(10)式为基础,分析光栅结构参数如槽深、栅脊宽度和位置对衍射效率的影响。在分析某一结构参数对衍射效率的影响时,将该参数设为变量、其他参数设为常量进行分析。由于 $+m$ 和 $-m$ 衍射级次衍射效率相同,这里统一用 $+m$ 的衍射效率表示。

3.1 槽深对衍射效率的影响

由(10)式可知,各衍射级次信号的衍射效率 η_m 随槽深 h 呈周期性变化,变化周期均为 $\lambda/2$;但是零级和其他衍射级次信号随槽深 h 的变化趋势正好相反。当槽深 h 为 $\lambda/4$ 的偶数倍时, η_0 取最大值

100%, $\eta_{m \neq 0}$ 取最小值 0, 非零衍射级均缺级。当槽深 h 为 $\lambda/4$ 的奇数倍时, η_0 取极小值 $4(0.5 - \sum_{i=1}^N f_i)^2$, $\eta_{m \neq 0}$ 取极大值 $\frac{4}{(m\pi)^2} \times$

$$\left| \sum_{i=1}^N \sin(m\pi f_i) \exp\left(-j\frac{2m\pi}{d}x_i\right) \right|^2。$$

当 $\{f_i\} = \{1/8, 1/8, 1/8\}, \{x_i\} = \{-d/4, 0, d/4\}$ 时,通过仿真研究 $\eta_0 \sim \eta_m$ 随槽深 h 的变化,如图 2 所示。可知,当 h 为 $\lambda/2$ 和 λ 时, $\eta_0 = 100\%$, 而第 1~9 衍射级均缺级;在槽深 h 为 $\lambda/4$ 和 $3\lambda/4$ 时, η_0 取极小值, $\eta_1 \sim \eta_9$ 取极大值。对于第 4 衍射级次,由于 $mf_i = 1/2$, η_4 极大值较大;对于第 8 衍射级次,由于 $mf_i = 1$, 第 8 衍射级次缺级。

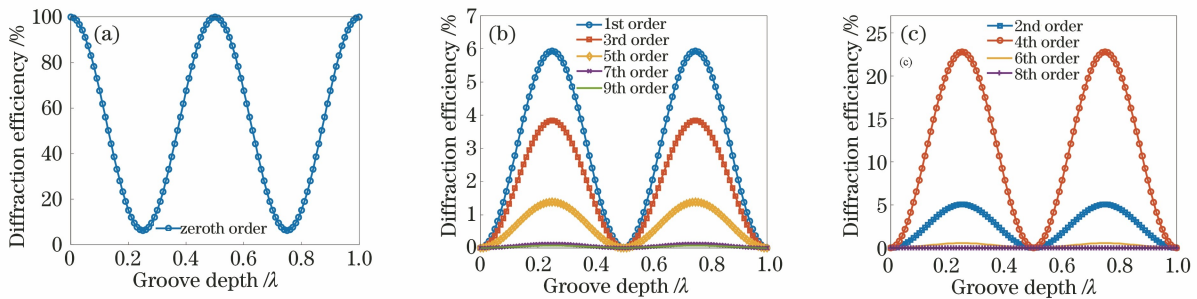


图 2 第 0~9 衍射级次信号的衍射效率随槽深的变化。(a)零级;(b)奇衍射级次;(c)偶衍射级次

Fig. 2 Diffraction efficiency of 0th-9th order signals as a function of groove depth.

(a) Zero order; (b) odd diffraction orders; (c) even diffraction orders

3.2 栅脊宽度对衍射效率的影响

由(10)式可知,零级信号衍射效率 η_0 可以表示为

$$\eta_0(h, f_i, x_i, N) = 4\sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda}h\right) \left(\frac{1}{2} - \sum_{i=1}^N f_i\right)^2 + \cos^2\left(\frac{2\pi}{\lambda}h\right), \quad (11)$$

因此 η_0 是以 $\sum_{i=1}^N f_i = 0.5$ 为对称轴的抛物线,如图 3 所示。在 $\sum_{i=1}^N f_i = 0.5$ 时, η_0 为极小值,为 $\cos^2\left(\frac{2\pi}{\lambda}h\right)$, 该值是以 h 为变量的周期函数。当槽深 h 为 $\lambda/4$ 且 $\sum_{i=1}^N f_i = 0.5$ 时, $\eta_0 = 0$ 即零级光缺级。

由(10)式可知, $m \neq 0$ 衍射级次信号的衍射效率随 f_i 呈周期性变化,变化周期为 $1/m$ 。当所有

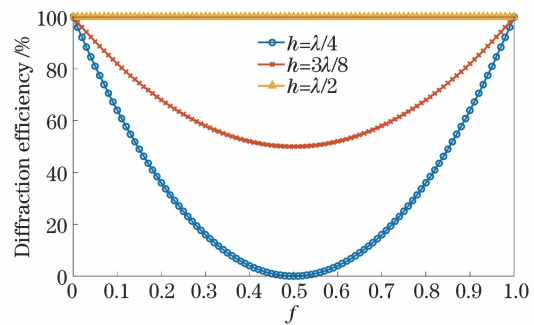


图 3 零级衍射效率随占空比的变化

Fig. 3 Diffraction efficiency of zero order as a function of duty ratio

f_i 均满足 $mf_i = n_1$ (n_1 为整数)时, $\eta_m = 0$, 即该衍射级缺级。当所有 f_i 均满足 $mf_i = n_1 - 1/2$ 且 n_1

为整数时, η_m 取极值 $\frac{4}{(m\pi)^2} \sin^2\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \times \left| \sum_{i=1}^N (-1)^{n_1-1} \exp\left(-j\frac{2m\pi}{d}x_i\right) \right|^2$ 。

当 $\{f_i\} = \{0.5, f_2\}, \{x_i\} = \{-d/4, d/4\}, h = \lambda/4$ 时, 仿真分析 $\eta_1 \sim \eta_9$ 随 f_2 的变化, 如图 4 所示。由于 $f_1 = 0.5$ 时奇衍射级次均满足 $mf_1 = n_1 - 1/2$, 并且由于两栅脊之间的中心距离为 $d/2$,

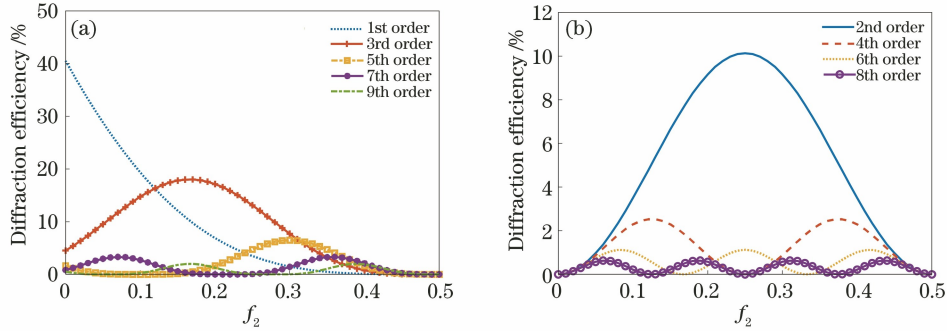


图 4 第 1~9 衍射级信号的衍射效率随 f_2 的变化。(a) 奇衍射级次; (b) 偶衍射级次

Fig. 4 Diffraction efficiency of 1st-9th order signals as a function of f_2 .

(a) Odd diffraction orders; (b) even diffraction orders

3.3 栅脊位置对衍射效率的影响

根据(10)式, 栅脊位置对零级信号的衍射效率没有影响; 其他衍射级次信号的衍射效率随栅脊位置呈周期性变化, 变化周期为 $1/m$ 。

当相邻栅脊之间的距离 Δx_i 均为 $n_2 d / (2m)$, 其中 n_2 为正整数时, 衍射效率 η_m 取极值:

$$\eta_m = \frac{4}{(m\pi)^2} \sin^2\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \left| \sum_{i=1}^N (-1)^{n_2} \sin(m\pi f_i) \right|^2. \quad (12)$$

当 $\{f_i\} = \{1/10, 1/10\}, \{x_i\} = \{-9d/20, x_2\}$ 且 $h = \lambda/4$ 时, $\eta_1 \sim \eta_9$ 随 x_2 的变化如图 5 所示, 可

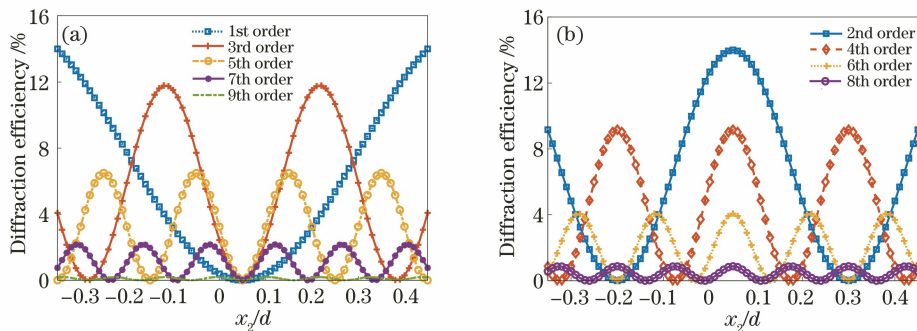


图 5 第 1~9 衍射级次信号的衍射效率随栅脊位置的变化。(a) 奇衍射级次; (b) 偶衍射级次

Fig. 5 Diffraction efficiency of 0th-9th order signals as a function of position of grating ridge.

(a) Odd diffraction orders; (b) even diffraction orders

因此当 f_2 满足 $mf_2 = n_1 - 1/2$ 时, η_m 可能增大也可能因缺级变为 0。如第 7 级衍射级次, 当 $f_2 = 1/14$ (≈ 0.0714) 时, η_7 取极大值; 当 $f_2 = 3/14$ (≈ 0.2143) 时, $\eta_7 = 0$ 。对于偶衍射级次, 由于满足 $mf_1 = n_1$, 因此第 1 个栅脊对于偶衍射级次信号的衍射效率没有影响; 当 f_2 满足 $mf_2 = n_1 - 1/2$ 时, η_m 均取到极大值。如当 $f_2 = 1/8, 3/8$ 时, η_4 均取到极大值。

以看出 η_m 呈周期性变化, 变化周期为 $1/m$; 由于 f_i 相等, 根据(12)式, 当 Δx 为 $(2n+1)d/(2m)$ 时, 第 m 衍射级次缺级。当两个栅脊之间的距离为 $2nd/(2m)$ 时, 第 m 衍射级次信号得到增强。对于第 5 衍射级次信号, 由于 $mf_i = 1/2$, 其衍射效率极大值为 $16/(5\pi)^2 \approx 6.48\%$ 。当 $x_2 = d/20$ 即 Δx 为 $d/2$ 时, 奇衍射级次信号均满足 $\Delta x = (2n+1)d/(2m)$, 因此奇衍射级次缺级; 偶衍射级次信号均满足 $\Delta x = 2nd/(2m)$, 因此偶衍射级次信号的衍射效率均取到极大值, 实际此时光栅前半周期结构和后半周期结构相同, 光栅的周期已变为 $d/2$ 。

4 多衍射级次增强型相位光栅

在相位光栅位置测量技术中,由于低衍射级次如第 1、3 衍射级次信号用于扩大测量范围,其衍射效率大于衍射效率阈值即可;而高衍射级次信号如第 5、7、9 衍射级次信号用于提高测量精度,其衍射效率越大,测量信号信噪比越高,则越有利于提高测量精度;零级和偶衍射级次信号作为杂散光的主要来源,需严格控制;并且由于设计要求 +m 衍射级次和 -m 衍射级次信号的初始相位相同,因此要求相位光栅具有 180° 旋转对称性^[1]。本节将在各约束条件下,分析增强型相位光栅衍射效率的变化,进而获得多衍射级次增强型相位光栅结构。

4.1 零级和偶衍射级次缺级

当占空比 $\sum_{i=1}^N f_i = 0.5$ 且槽深 h 为 $\lambda/4$ 的奇数倍时,零级缺级,如图 6 所示。通过调整栅脊宽度和位置可以使偶衍射级次均缺级。当占空比满足 $\sum_{i=1}^N f_i = 0.5$,且栅脊位置满足前半周期 $[-d/2, 0]$

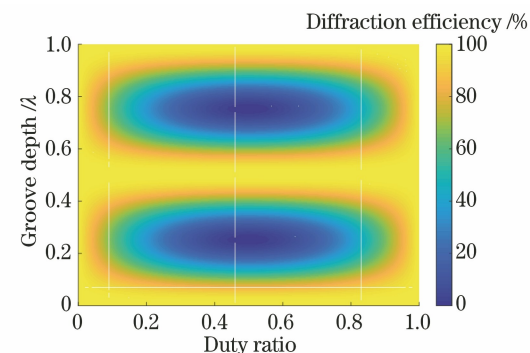
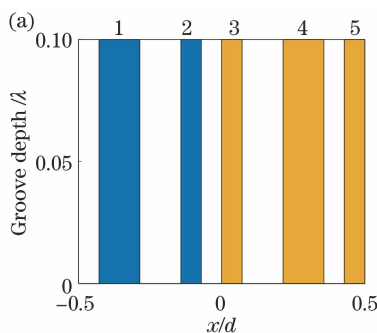


图 6 零级衍射光束的衍射效率随槽深和占空比的变化
Fig. 6 Diffraction efficiency of 0th order signal as a function of groove depth and duty ratio

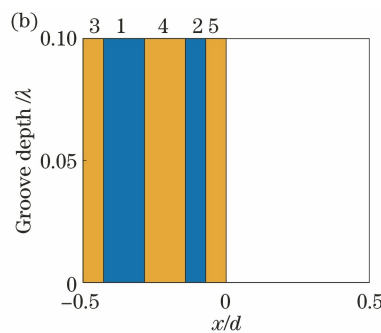


图 7 偶衍射级次缺级的相位光栅结构和特性。(a)偶衍射级次缺级的相位光栅结构;(b)前半周期结构和后半周期结构互补
Fig. 7 Phase grating structure without even diffraction orders and its characteristic. (a) Phase grating structure without even diffraction orders; (b) first half-period structure and second half-period structure are complementary

表 1 零级和偶衍射级次缺级的相位光栅结构参数

Table 1 Structural parameters of phase grating without zero and even order diffraction

| Parameter | Ridge width | Ridge position | Groove depth / λ |
|-----------|------------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| Value | 2/14, 1/14, 1/14, 2/14, 1/14 | -10/28, -3/28, 1/28, 8/28, 13/28 | 0.25 |

表 2 零级和偶衍射级次缺级的相位光栅结构的衍射效率

Table 2 Diffraction efficiency of phase grating without zero and even order diffraction

| Order | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|----------------------------|---|------|---|-------|---|-------|---|------|---|------|
| Diffraction efficiency / % | 0 | 1.59 | 0 | 10.89 | 0 | 17.09 | 0 | 7.44 | 0 | 5.28 |

因此,在设计增强型相位光栅时,为保证零级和偶衍射级次均缺级,则占空比需满足 $\sum_{i=1}^N f_i = 0.5$,槽深 h 为 $\lambda/4$ 奇数倍,并且前半周期结构和后边周期结构互补。

结构与后半周期 $[0, d/2]$ 结构互补时,如图 7 所示,偶衍射级次均缺级^[20-23]。因此当光栅结构满足偶衍射级次缺级条件并且槽深 h 为 $\lambda/4$ 奇数倍时,零级和偶衍射级次均缺级。满足零级和偶衍射级次均缺级的光栅结构参数如表 1 所示,由(10)式计算得到的衍射效率如表 2 所示。可知,零级和偶衍射级次的衍射效率均为 0,即零级和偶衍射级次均缺级。

4.2 180° 旋转对称性

在满足零级和偶衍射级次缺级的条件下,考虑 180° 旋转对称性的要求,设计相位光栅结构如图 8 所示。该结构可分为 4 部分,其中前半周期被 $x = -d/4$ 分为互补的两部分 G1 和 G2,后半周期被

$x = d/4$ 分为互补的两部分 G3 和 G4;且整体结构关于 $x = 0$ 轴呈偶对称。由于整体结构满足互补性,且满足 180° 旋转对称,因此需要栅脊个数 N 为奇数。本文分析 $N = 3, 5$ 的情况。 $N > 5$ 时,由于相位光栅位移传感器中光栅周期通常为 $16 \mu\text{m}$,因此,当 $N > 5$ 时栅脊宽度接近入射波长(可见光波段),标量衍射理论误差较大,这里不进行分析。

当 $N = 3$ 时,光栅结构如图 9 所示,其结构参数只有一个变量 f_1 ,其他参数均可通过 f_1 确定为

$$\begin{cases} f_2 = 0.5 - 2f_1 \\ f_3 = f_1 \\ x_1 = -0.25 - f_1/2. \\ x_2 = 0 \\ x_3 = -x_1 \end{cases} \quad (13)$$

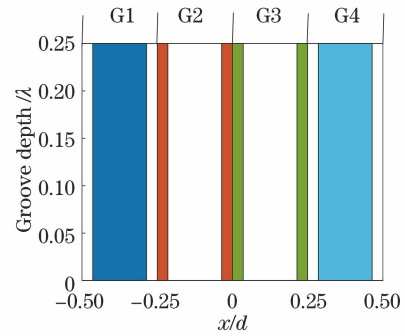


图 8 满足零级和偶衍射级次缺级且 180° 旋转对称的增强型相位光栅结构

Fig. 8 Enhanced phase grating structure with 180° rotational symmetry and without zero and even diffraction orders

在此条件下,根据(10)式,衍射效率 η_m 可表示为

$$\eta_m = \begin{cases} 0, & m = 0, \pm 2, \pm 4 \dots \\ \frac{4}{(m\pi)^2} |1 - 4\sin^2(m\pi f_1)|^2, & m = \pm 1, \pm 3, \pm 5 \dots \end{cases} \quad (14)$$

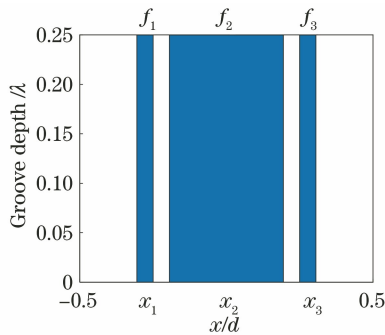


图 9 当 $N = 3$ 时零级和偶衍射级次缺级的光栅结构
Fig. 9 Grating structure with zero and even order diffraction missing when $N = 3$

当 $N = 5$ 时,光栅结构如图 10 所示,其结构参数有两个变量 f_1 和 f_2 ,其他参数均可通过 f_1 和 f_2 确定为 $f_3 = 0.5 - 2 \times (f_1 + f_2)$, $f_4 = f_1$, $f_5 =$

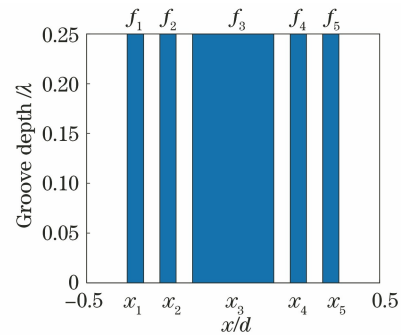


图 10 当 $N = 5$ 时零级和偶衍射级次缺级的增强型光栅结构
Fig. 10 Enhanced grating structure without zero and even diffraction orders when $N = 5$

$f_2, x_1 = -0.25 - f_2 - f_1/2, x_2 = -0.25 + f_2/2, x_3 = 0, x_4 = -x_1, x_5 = -x_2$ 。

在此条件下,根据(10)式,衍射效率 η_m 可表示为

$$\eta_m = \begin{cases} 0, & m = 0, \pm 2, \pm 4 \dots \\ \frac{4}{(m\pi)^2} |1 - 4\sin(m\pi f_1)\sin[m\pi(f_1 + 2f_2)]|^2, & m = \pm 1, \pm 3, \pm 5 \dots \end{cases} \quad (15)$$

4.3 多高奇衍射级次信号增强

根据(14)式和(16)式较易获得零级和偶衍射级次缺级和针对某一高奇衍射级次信号增强的相位光栅。例如针对第 5 衍射级次,当栅脊个数 N 为 3、 $f_1 = 1/10$ 时,第 5 衍射级次信号的衍射效率增大为

14.59%,但是该光栅的第 9 衍射级次信号的衍射效率仅为 0.49%。因此,需分析栅脊宽度对衍射效率的影响,并综合考虑多高奇衍射级次如 5、7、9 等,以优化栅脊的宽度,获得多衍射级次信号和增强的相位光栅结构。

当栅脊个数 $N=3$ 时,由(14)式可知:

1) 当 $\sin^2(m\pi f_1)=1$,即 $f_1=(2n-1)/(2m)$ 时,第 m 奇衍射级次信号增强,此时 $\eta_m=9 \times 4/(m\pi)^2$,比 AH11 的衍射效率提高 9 倍。

2) 当 $\sin^2(m\pi f_1)=0.25$,即 $f_1=n/m+1/(6m)$ 或 $f_1=n/m+5/(6m)$ 时,第 m 奇衍射级次缺级。

3) 当 $\sin^2(m\pi f_1)=0$,即 $f_1=2n/(2m)$ 时, η_m 取次极大值 $4/(m\pi)^2$,与 AH11 衍射效率相同。

仿真分析 η_m 随 f_1 的变化,仿真结果如图 11 所示。对于第 3 衍射级次,当 $f_1=1/6(\approx 0.167)$ 时,由于 $\sin^2(m\pi f_1)=1$, η_3 取极大值,为 $4/(\pi)^2$,此时增强型光栅已变为周期为 $d/3$ 、占空比为 0.5 的标准型光栅,因此仅存在 3 的奇数倍衍射级次,如第 3 衍射级和第 9 衍射级次;当 $f_1=1/18(\approx 0.056)$ 时, $\sin^2(3\pi f_1)=0.25$, $\eta_3=0$ 。对于第 5 衍射级次,当 $f_1=1/10$ 时, η_5 取极大值,为 $36/(5\pi)^2$;当 $f_1=1/30(\approx 0.033)$ 、 $1/6(\approx 0.167)$ 和 $11/30(\approx 0.367)$ 时, $\sin^2(5\pi f_1)=0.25$, $\eta_5=0$;当 $f_1=1/5$ 时, η_5 取到次极大值,为 $4/(5\pi)^2$ 。对于第 7 衍射级次和第 9 衍射级次信号,其衍射效率均有两个极大值,分别为 $1/14(\approx 0.071)$ 、 $3/14(\approx 0.214)$ 和 $1/18(\approx 0.056)$ 、 $1/6(\approx 0.167)$,但是当 $f_1=1/6(\approx 0.167)$ 时,增强型光栅已变为标准型光栅,这在第 3 衍射级次中已说明。

由于各衍射级次的极值位置不同,当某一衍射

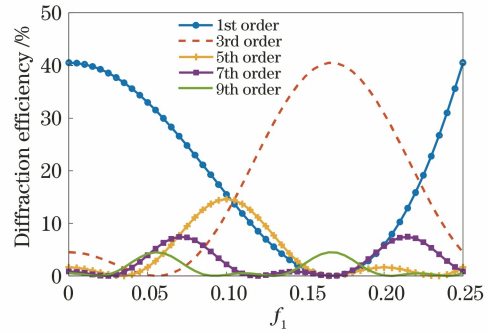


图 11 各奇衍射级次信号的衍射效率随 f_1 的变化
Fig. 11 Diffraction efficiency of odd diffraction orders as a function of f_1

级次信号的衍射效率取到极值时,另一衍射级次信号的衍射效率可能较小,甚至缺级,如当 $f_1=1/18$ 时, η_9 取到极大值,但是 $\eta_3=0$ 。综合考虑各衍射级次的衍射效率,选评价函数为

$$W = \sum_{m=1}^9 \omega_m \eta_m / \eta_m^{\max}, \quad (16)$$

式中: η_m^{\max} 为 f_1 变化时第 m 阶奇衍射级次信号的最大衍射效率,用于将第 m 阶奇衍射级次信号的衍射效率归一化; ω_m 为第 m 阶奇衍射级次的权重,高衍射级次需配置较高的 ω_m ,通过调整 ω_m 可以获得较好的结构。当 $\{\omega_m\}=\{0.05, 0.10, 0.25, 0.30, 0.30\}$,其中 $m=1, 3, 5, 7, 9$ 时,评价函数 W 随 f_1 的变化如图 12 所示。 W 极值点位于 $f_1=0.066$,将该增强型光栅结构命名为 IME3,光栅结构如图 12 (b)所示,其参数如表 3 所示。

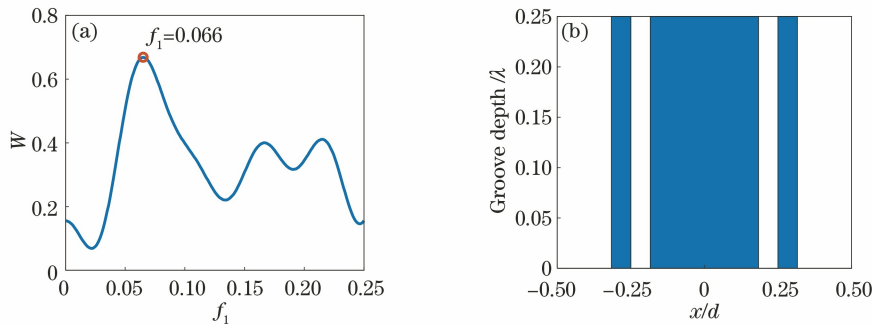


图 12 栅脊个数 $N=3$ 时的优化光栅结构。(a)评价函数 W 随 f_1 的变化;(b) IME3 结构
Fig. 12 Optimized grating structure when number of ridges $N=3$. (a) Evaluation function W as a function of f_1 ; (b) structure of IME3

表 3 IME3 结构参数

Table 3 Structural parameters of IME3

| Parameter | Ridge width | Ridge position | Groove depth / λ |
|-----------|---------------|----------------|--------------------------|
| IME3 | 0.066, 0.368, | 0.283, 0, | 0.250 |
| | 0.066 | 0.283 | |

当栅脊个数 $N=5$ 时,由(16)式可知:

1) 当 f_1 和 f_2 均为 $(2n-1)/(2m)$ 时,第 m 衍射级次信号的衍射效率取到极大值, $\eta_m=25 \times 4/(m\pi)^2$,比 AH11 衍射效率提高 25 倍。

b) 当 $\sin(m\pi f_1) \sin[m\pi(f_1+2f_2)]=1/4$ 时,第 m 衍射级次缺级。

c) 当 f_1 为 $(2n-1)/(2m)$ 、 f_2 为 $2n/(2m)$ 或者 f_2 为 $2n/(2m)$ 、 f_1 为 $(2n-1)/(2m)$ 时, η_m 取次极大值, $\eta_m = 9 \times 4 / (m\pi)^2$, 比 AH11 衍射效率提高 9 倍。

η_m 随 f_1 和 f_2 变化的仿真结果如图 13 所示。根据(15)式, $f_1 + f_2 < 0.25$, 因此仿真图形在下角区域有意义。第 3 衍射级次的极值点位于 $f_1 = 1/6, f_2 = 0$, 此时 $N = 3$, 且增强型光栅已变为标准

型光栅; 第 5 衍射级次的极值点为 $f_1 = 1/10, f_2 = 1/10, \eta_5$ 取极大值, 为 $4 / (\pi)^2$, 此时增强型光栅已变周期为 $d/5$ 、占空比为 0.5 的标准型光栅; 第 7 衍射级次的极值点位于 $f_1 = 1/14, f_2 = 1/14$, 此时 $\eta_7 = 25 \times 4 / (7\pi)^2$, 比 AH11 提高 25 倍; 第 9 衍射级次存在 3 个极值点, 分别对应: $f_1 = 1/18, f_2 = 1/18; f_1 = 3/18, f_2 = 1/18; f_1 = 1/18, f_2 = 3/18$ 。此时对应的 $\eta_9 = 25 \times 4 / (9\pi)^2$, 同样比 AH11 提高 25 倍。

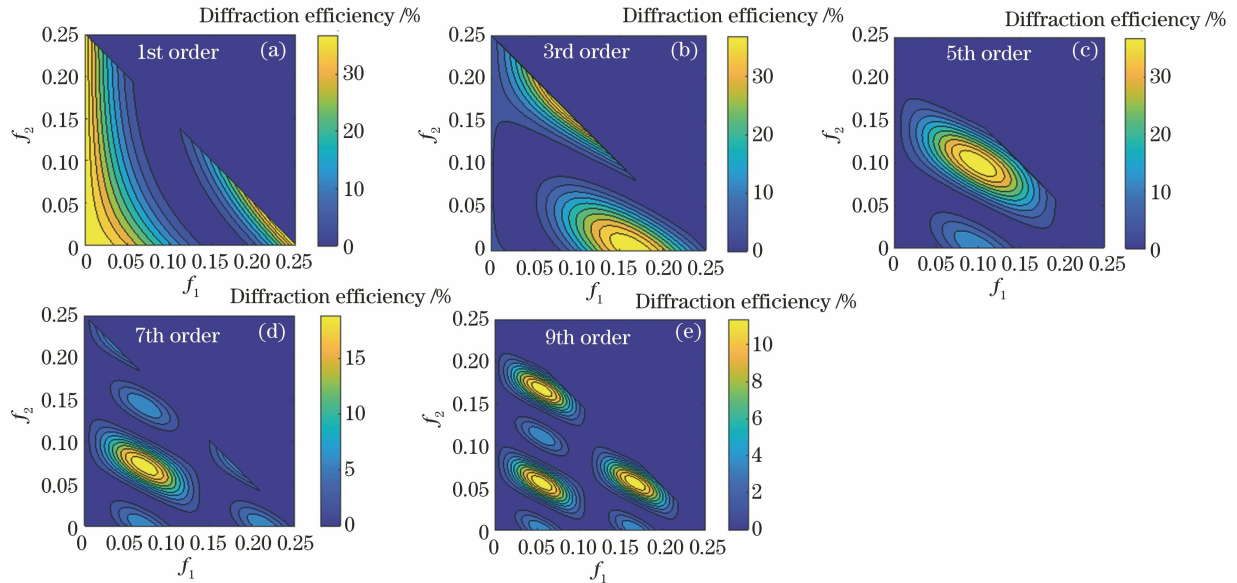


图 13 各奇衍射级次信号的衍射效率随 f_1 和 f_2 的变化。(a)第 1 衍射级次; (b)第 3 衍射级次; (c)第 5 衍射级次; (d)第 7 衍射级次; (e)第 9 衍射级次

Fig. 13 Diffraction efficiency of odd diffraction order signals as a function of f_1 and f_2 . (a) 1st diffraction order; (b) 3rd diffraction order; (c) 5th diffraction order; (d) 7th diffraction order; (e) 9th diffraction order

综合考虑各衍射级次的衍射效率, 评价函数如(17)式所示, 当 $\{w_m\} = \{0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30\}$ (其中 $m = 1, 3, 5, 7, 9$), W 随 f_1 和 f_2 的变化

如图 14(a) 所示。W 极值点在 $f_1 = 0.065, f_2 = 0.154$ 时取得, 将此时的结构命名为 IME5, 如图 14(b) 所示, 其参数如表 4 所示。

表 4 IME5 结构参数

Table 4 Structural parameters of IME5

| Parameter | Ridge width | Ridge position | Groove depth/ λ |
|-----------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| IME5 | 0.065, 0.154, 0.062, 0.154, 0.065 | 0.4365, 0.3270, 0, 0.3270, 0.4365 | 0.25 |

4.4 比较验证

为验证 IME3 和 IME5 的设计效果以及理论模型的正确性, 采用 RCWA 方式计算各结构的衍射效率, 并将其与(10)式计算结果进行对比。仿真中光栅周期为 $16 \mu\text{m}$, 材料为硅, 周围介质为空气。在入射波长为 633 nm 且正入射的情况下, 硅的折射率为 3.48, 周围空气的折射率为 1。

AH11、AH53 在一个周期内的光栅结构如图 15 所示。采用严格耦合波在 TE 偏振情况下比较各衍射级次效果, 如图 16 所示。采用 RCWA 和

(10)式计算各结构的衍射效率, 如表 5 所示。虽然 AH11 的零级和偶衍射级次缺级, 但是其高奇衍射级次衍射效率较低, 其第 9 衍射级次的衍射效率为 0.17%; 虽然 AH53 增强了第 5 衍射级次信号, 但是其存在较强的偶衍射级次信号, 且其第 7、9 衍射级次信号的衍射效率仅为 0.07% 和 0.04%, 接近于衍射效率阈值 0.015%^[11]; 而 IME3、IME5 使零级和偶衍射级次信号缺级, 并且同时增强了第 5、7、9 衍射级次信号, 其中 IME3 的第 5、7、9 衍射级次信号的衍射效率分别为 2.06%, 2.49%, 1.29%;

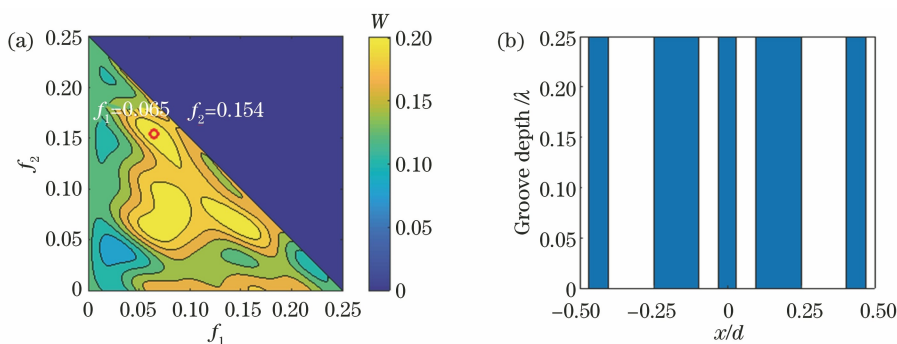


图 14 栅脊个数 $N=5$ 时的优化光栅结构。(a) 评价函数随 f_1 和 f_2 的变化; (b) IME5 的结构
Fig. 14 Optimized grating structure when number of ridges $N=5$. (a) Evaluation function as a function of f_1 and f_2 ; (b) structure of IME5

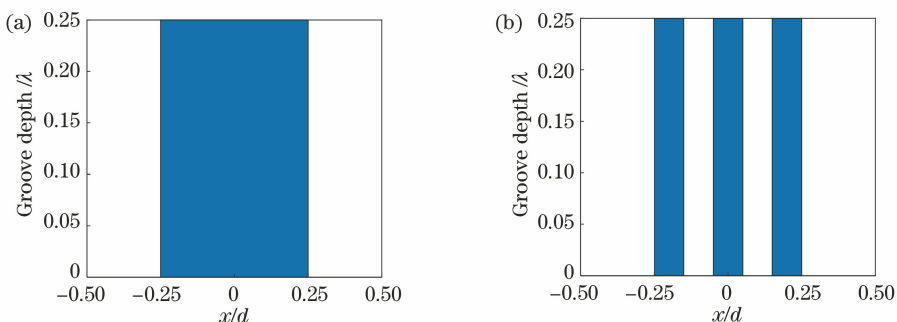


图 15 一个周期内的相位光栅结构。(a) AH11; (b) AH53
Fig. 15 Structures of phase grating in a period. (a) AH11; (b) AH53

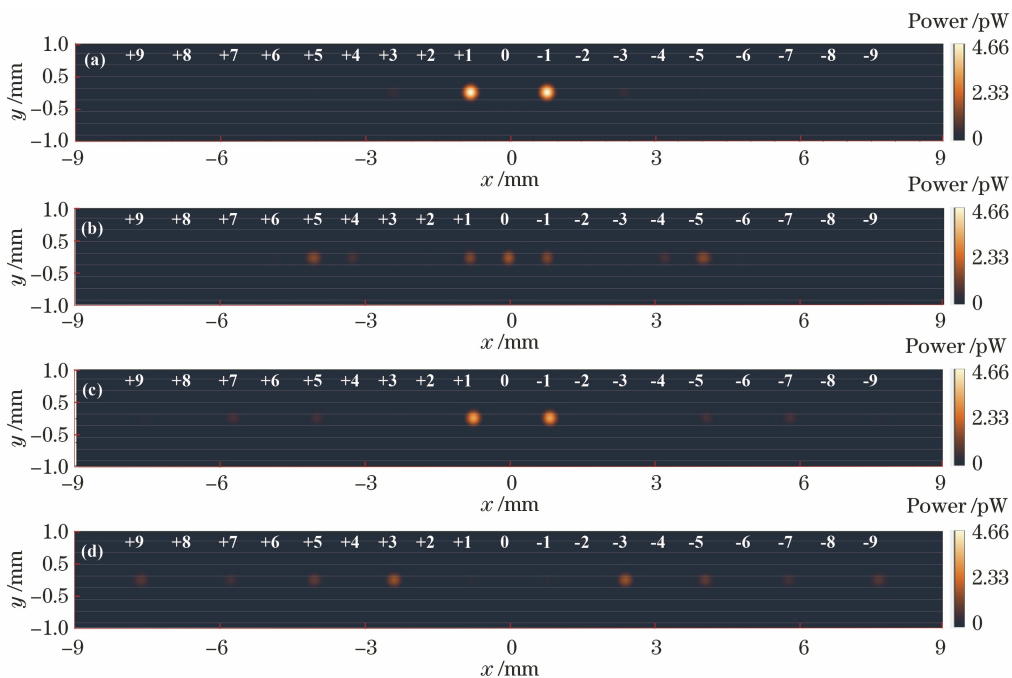


图 16 TM 偏振照明情况下, 采用严格耦合波仿真得到的各结构的衍射效果图。(a) AH11; (b) AH53; (c) IME3; (d) IME5
Fig. 16 Diffraction results of each structure obtained by rigorous coupled-wave analysis method for TM polarization illumination. (a) AH11; (b) AH53; (c) IME3; (d) IME5

IME5 的第 5、7、9 衍射级次信号的衍射效率分别为 3.16%、2.13%、3.49%。因此, IME3 和 IME5 优于 AH11 和 AH53。通过比较表 5 中严格耦合波和基于标量衍射理论计算结果可知, 对于 AH11, 两者

计算结果相同;对于其余结构,两者的计算结果存在差异;AH53 的零级衍射效率偏差最大,其标量衍射理论结果与 TM 偏振计算结果偏差较大(0.61%),与 TE 偏振计算结果偏差较小(0.04%)。这主要是由于增强型相位光栅经过细分后,栅脊宽度更加接

近入射波长。因此本文的理论模型受标量衍射理论的限制,适用于光栅周期大于入射波长 5 倍以上的结构且栅脊宽度大于 2 倍入射波长的情况,对于光栅周期接近或小于入射波长的情况,需采用矢量的方法^[24]。

表 5 比较严格耦合波和标量衍射理论计算的各结构衍射效率

Table 5 Comparison of diffraction efficiency of each structure calculated by using RCWA and scalar diffraction theory %

| Order | AH11 | | | AH53 | | | IME3 | | | IME5 | | |
|-------|-------|-------|--------------------|------|------|--------------------|------|------|--------------------|------|------|--------------------|
| | TM | TE | Scalar | TM | TE | Scalar | TM | TE | Scalar | TM | TE | Scalar |
| | | | diffraction theory | | | diffraction theory | | | diffraction theory | | | diffraction theory |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 4.96 | 5.53 | 5.57 | 0.02 | 0.12 | 0 | 0.04 | 0.32 | 0 |
| 1 | 14.12 | 14.12 | 14.12 | 3.80 | 3.69 | 3.53 | 9.73 | 9.73 | 9.85 | 0.90 | 0.87 | 0.90 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0.49 | 0.48 | 0.47 | 0.01 | 0.08 | 0.00 | 0.01 | 0.03 | 0 |
| 3 | 1.57 | 1.57 | 1.57 | 0.41 | 0.40 | 0.39 | 0.20 | 0.21 | 0.17 | 5.30 | 5.38 | 5.31 |
| 4 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 2.14 | 2.08 | 2.09 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0 | 0.01 | 0 |
| 5 | 0.56 | 0.56 | 0.56 | 5.03 | 4.92 | 5.08 | 2.16 | 2.21 | 2.06 | 3.24 | 3.27 | 3.26 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0.87 | 0.86 | 0.93 | 0 | 0 | 0 | 0.01 | 0.05 | 0 |
| 7 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.06 | 0.06 | 0.07 | 2.46 | 2.53 | 2.46 | 2.11 | 2.15 | 2.13 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.00 | 0.01 | 0 | 0 | 0.02 | 0 |
| 9 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.02 | 0.02 | 0.04 | 1.20 | 1.25 | 1.29 | 3.43 | 3.56 | 3.49 |

5 结 论

根据标量衍射理论,建立了增强型相位光栅结构和衍射效率的理论模型,并采用 RCWA 矢量方法验证了该模型,这为光栅设计提供支撑。基于该模型详细分析了槽深、栅脊宽度以及栅脊位置对衍射效率的影响,获得了各衍射级次缺级和信号增强的条件;分析了在偶衍射级次缺级相关约束条件下衍射效率的变化,从而获得多奇衍射级次信号增强的相位光栅结构 IME3 和 IME5。通过仿真验证可得,这些结构不仅使零级和偶衍射级次均缺级,并且增强了第 5、7、9 衍射级次信号。IME3 和 IME5 的第 7 衍射级次信号的衍射效率分别为 2.46% 和 2.13%,比 AH11 分别提高了 8 倍和 7 倍,比 AH53 分别提高了 82 倍和 71 倍。并且其第 9 衍射级次信号的衍射效率分别为 1.29% 和 3.49%,比 AH11 分别提高了 8 倍和 21 倍,比 AH53 分别提高了 32 倍和 87 倍。

参 考 文 献

- [1] den Boef A J. Optical wafer metrology sensors for process-robust CD and overlay control in semiconductor device manufacturing [J]. Surface Topography: Metrology and Properties, 2016, 4(2): 023001.
- [2] Tam W M. Motion measurement and alignment method and apparatus: US4547446[P]. 1985-10-15.
- [3] Orji N G, Badaroglu M, Barnes B M, et al. Metrology for the next generation of semiconductor devices[J]. Nature Electronics, 2018, 1(10): 532-547.
- [4] Bunday B, Bello A F, Solecky E, et al. 7/5 nm logic manufacturing capabilities and requirements of metrology[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10585: 105850I.
- [5] Li Y Q, Liu Y, Liu L H. Effect of thermal deformation on imaging performance for 16 nm extreme ultraviolet lithography objective [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(1): 0122001.
李艳秋, 刘岩, 刘丽辉. 16 nm 极紫外光刻物镜热变形对成像性能影响的研究 [J]. 光学学报, 2019, 39(1): 0122001.
- [6] Du J Y, Dai F Z, Wang X Z. Calibration method for alignment error caused by asymmetric deformation of mark and its application in overlay measurement[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0704004.
杜聚有, 戴凤钊, 王向朝. 标记非对称变形导致的对准误差修正方法及其在套刻测量中的应用 [J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0704004.
- [7] Keij S, Setija I, van der Zouw G, et al. Advances in phase-grating-based wafer alignment systems [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5752: 948-960.
- [8] Miyasaka M, Saito H, Tamura T, et al. The application of SMASH alignment system for 65-55-

- nm logic devices [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6518: 65180H.
- [9] Du J Y, Dai F Z, Bu Y, et al. Alignment technique using moire fringes based on self-coherence in lithographic tools [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1204006.
杜聚有, 戴凤钊, 步扬, 等. 基于自相干叠栅条纹的光刻机对准技术 [J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1204006.
- [10] Wittekoek S, van der Werf J, George R A. Phase gratings as waferstepper alignment marks for all process layers [J]. Proceedings of SPIE, 1985, 0538: 24-31.
- [11] Lee B S, Kim Y H, Hwang H, et al. Overcoming low-alignment signal contrast induced alignment failure by alignment signal enhancement [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9780: 97800B.
- [12] Bornebroek F, Burghoorn J, Greeneich J S, et al. Overlay performance in advanced processes [J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4000: 520-531.
- [13] Cui Y T, Goodwin F, van Haren R. Segmented alignment mark optimization and signal strength enhancement for deep trench process [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5375: 1265-1277.
- [14] Hinnen P, Lee H W, Keij S, et al. Flexible alignment mark design applications using a next generation phase grating alignment system [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5752: 363-374.
- [15] Menchtchikov B, Socha R, Zheng C M, et al. Reduction in overlay error from mark asymmetry using simulation, ORION, and alignment models [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10587: 105870C.
- [16] Chen L W, Yang M, Yang E, et al. Novel ATHENA mark design to enhance alignment quality in double patterning with spacer process [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7640: 764020.
- [17] Zhou J M, Hickman C, He Y, et al. Wafer quality analysis of various scribe line mark designs [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7971: 79711H.
- [18] Du J Y, Dai F Z, Wang X Z. Alignment mark optimization for improving signal-to-noise ratio of wafer alignment signal [J]. Applied Optics, 2019, 58(1): 9-14.
- [19] Zhang L B, Dong L S, Su X J, et al. New alignment mark designs in single patterning and self-aligned double patterning [J]. Microelectronic Engineering, 2017, 179: 18-24.
- [20] Zhang L B, Feng Y B, Dong L S, et al. New alignment mark design structures for higher diffraction order wafer quality enhancement [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10145: 101452C.
- [21] Morrison R L. Symmetries that simplify the design of spot array phase gratings [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1992, 9(3): 464-471.
- [22] Xi P, Zhou C H, Zhao S, et al. Design and fabrication of 64×64 spot array Dammann grating [J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, 28(4): 369-371.
席鹏, 周常河, 赵帅, 等. 64×64 点阵达曼光栅的设计与实现 [J]. 中国激光, 2001, 28(4): 369-371.
- [23] Zhou C H. Dammann grating principle and application [M]. Beijing: Science Press, 2017: 5-7.
周常河. 达曼光栅原理及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2017: 5-7.
- [24] Chen D W. Rigorous coupled wave analysis of the diffractive optics [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2004.
陈德伟. 衍射光学中的严格耦合波分析方法 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2004.