

共振域相位光栅标记设计方法

周光迎^{1,2}, 齐月静^{1,2*}, 齐威¹, 卢增雄^{1,2}, 苏佳妮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 相位光栅(PG)标记是微位移测量系统的关键部件,提出了一种严格耦合波(RCWA)法与差分进化算法相结合的共振域PG标记设计方法,解决了标量衍射理论计算精度不足和参数遍历设计方法耗时太久的问题。基于自参考干涉位移测量模型,确定以测量光信噪比(SNR)之和最大为光栅标记设计的评价函数,并研究了不同入射光波长、偏振态和光栅周期下,RCWA法中空间谐波数与计算精度的关系。针对多波长照明微位移测量需求,利用所提方法进行了标记设计,并与常规设计方法进行了比对分析。结果表明:对于3.2 μm周期的PG,横磁(TM)光照时光栅占空比取0.484,槽深取161.5 nm,此时SNR之和可达到最大值586.63;较常规设计方法,所提方法设计PG标记的时间缩短到了其的0.2%,SNR之和最大提升比例可达到24.4%。

关键词 光栅; 位移测量系统; 严格耦合波法; 空间谐波数; 差分进化算法

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2105001

Design Method of Phase Grating Mark in Resonance Domain

Zhou Guangying^{1,2}, Qi Yuejing^{1,2*}, Qi Wei¹, Lu Zengxiong^{1,2}, Su Jiani¹¹Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Phase grating (PG) mark is a key component of a micro-displacement measurement system. In this paper, a design method of PG mark in resonance domain combining rigorous coupled wave analysis (RCWA) method with differential evolution algorithm is proposed to address issues including insufficient calculation accuracy of scalar diffraction theory and time consuming of parameter traversal design method. Firstly, according to the self-reference interference displacement measurement model, the maximum sum of measured optical signal-to-noise ratio (SNR) is regarded as the evaluation function of grating mark design. The relationship between the number of spatial harmonics and calculation accuracy in RCWA method is studied under different incident light wavelengths, polarization states, and grating periods. In view of the measurement requirement of multi-wavelength illumination micro-displacement, the proposed method is used to design the mark, and it is compared with conventional design methods. The results show that for the PG with period of 3.2 μm, the duty cycle of the grating is 0.484, and the groove depth is 161.5 nm under transverse magnetic (TM) light. Furthermore, the sum of SNR reaches the maximum value of 586.63. Compared with conventional design methods, the proposed method shortens the time in designing the PG mark to 0.2%, and the maximum improvement ratio of the sum of SNR reaches 24.4%.

Key words gratings; displacement measurement system; rigorous coupled wave analysis method; spatial harmonic number; differential evolution algorithm

1 引言

相位光栅(PG)微位移测量技术具有非接触测量、测量精度高等特点,被广泛应用于集成电路装备硅片

位置的测量中^[1-2]。PG是实现微位移测量的关键元件,其参数直接决定了系统的测量能力^[3]。按入射光波长与光栅周期尺寸的相对关系,光栅分为常规光栅($p/\lambda > 10$)、共振域光栅($1/2 < p/\lambda < 10$)和亚波长光栅

收稿日期: 2022-03-14; 修回日期: 2022-05-04; 录用日期: 2022-05-16

基金项目: 国家科技重大专项(2018ZX02101005)

通信作者: *qiyuejing@ime.ac.cn

$(p/\lambda < 1/2)^{[4-5]}$, 其中 p 为光栅周期, λ 为波长。PG 作为测量标记, 减小其周期可提升系统的测量分辨力, 同时减少工艺导致的光栅非对称变形对精度的影响^[6-7]。为此, 开展共振域 PG 标记设计方法研究具有重要的理论和应用价值。

常规光栅利用标量衍射理论分析即可满足精度需求, 杨光华等^[8-10]基于标量理论分析了常规光栅槽深、栅脊宽度和非对称性对衍射效率和测量精度的影响。共振域光栅则需要利用矢量衍射理论来分析, 相关的数值计算方法有严格耦合波法^[11]、模式法^[12]和有限差分时分域(FDTD)法^[5]等。高华等^[5, 13-14]基于 FDTD 法研究了共振域光栅的衍射偏振特性, 通过参数遍历方法获得了不同偏振态下光栅的衍射特性, 与标量计算结果存在明显差异。基于矢量衍射理论的计算精度比基于标量求解的方法高, 能更好地分析光栅结构和衍射场之间的关系, 但存在计算速度慢、耗时久的问题, 以往光栅设计方面的研究鲜有关于结合测量系统且引入优化算法的公开报道。

本文结合 PG 微位移测量原理和标记可优化参数, 提出了一种严格耦合波法与差分进化算法相结合的 PG 标记设计方法, 解决了标量衍射理论存在的计

算精度不足和参数遍历设计方法存在的耗时太久的问題。以阿斯麦公司 AA5、AA7 和 AA10^[15]三个典型共振域 PG 标记为例, 研究了不同入射光波长、偏振态和光栅周期下, 严格耦合波法中空间谐波数与计算精度的关系, 并给出了针对特定系统, 空间谐波数确定的方法。针对多波长照明微位移测量需求, 利用所提方法进行了标记设计, 将所提方法与常规设计方法进行了对比分析, 验证了所提方法的有效性。

2 基本原理

2.1 相位光栅微位移测量系统模型

多波长 PG 微位移测量系统中, 多波长的设计可以减小槽深变化对测量信号的影响, 提升系统的工艺适应性。多波长 PG 微位移测量系统的原理如图 1 所示, n 个不同波长($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$)的测量光束经多色激光组成器(MLC)合成后经过光学系统照射到 PG 上, 产生正负衍射级次光束。正负衍射级次光束经过透镜(L)和自参考干涉仪(SRI)后产生两个相对旋转 180° 的重叠光束。正负衍射光之间的相位差会随光栅的移动而改变, 故会在干涉处产生余弦变化的光强信号。对该余弦信号进行解算后, 可得到标记的位移信息^[16]。

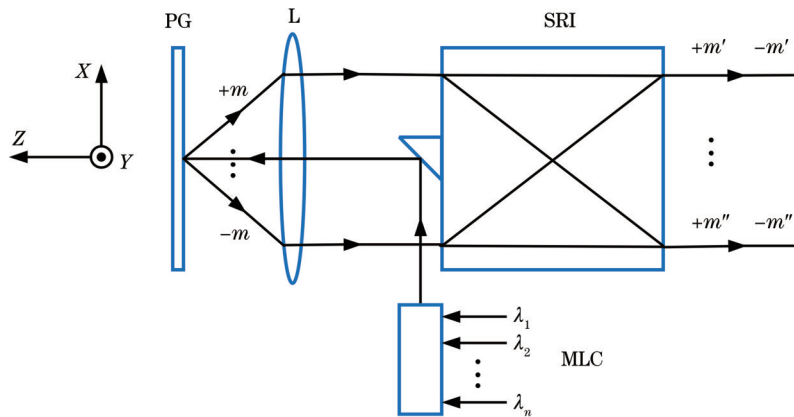


图 1 PG 微位移测量系统原理

Fig. 1 Principle of PG micro-displacement measurement system

测量系统中 $\pm m$ 级衍射光干涉前的频率相同, 传播方向相同, 复振幅可表示为

$$E_{+m}(\mathbf{r}, t) = E_{+m} \exp[j(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \varphi_{0,+m})], \quad (1)$$

$$E_{-m}(\mathbf{r}, t) = E_{-m} \exp[j(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \varphi_{0,-m})], \quad (2)$$

式中: E_{+m} 和 E_{-m} 分别为 $\pm m$ 级衍射光的振幅; \mathbf{k} 和 ω 分别为 $\pm m$ 级衍射光的波矢和频率; \mathbf{r} 为波面上一点的位置矢量; $\varphi_{0,+m}$ 和 $\varphi_{0,-m}$ 分别为 $\pm m$ 级衍射光的初相位。 $\pm m$ 级衍射光干涉后的光强信号为

$$I = I_{+m} + I_{-m} + 2\sqrt{I_{+m}I_{-m}} \cos \Delta\varphi, \quad (3)$$

式中: I_{+m} 和 I_{-m} 分别为 $+m$ 级次衍射光的光强和 $-m$ 级次衍射光的光强; $\Delta\varphi = \varphi_{0,+m} - \varphi_{0,-m}$ 为 $\pm m$ 级衍射光的相位差。对于理想系统, 当光栅沿着 X 方向移动时, 由多普勒效应可知, 当光栅位移距离为 x 时, 干涉后的光强信号为

$$I = I_{+m} + I_{-m} + 2\sqrt{I_{+m}I_{-m}} \cos\left(\frac{4\pi m}{p}x\right). \quad (4)$$

由式(4)可得, 位移测量信号呈现余弦形式分布, 此时可以通过位移测量信号的相位信息 φ 计算出测量标记的位移 x , 即

$$x = \frac{p}{4\pi m} \varphi. \quad (5)$$

由于相位信息 φ 在 $0 \sim 2\pi$ 之间取值, 位移测量系统的最小量程由光栅周期 p 和所用衍射级次 m 决定, 故在光栅周期和所用衍射级次确定的情况下, 提升系统的相位分辨力可以提高系统的测量精度。

测量信号的信噪比(SNR)是影响系统相位分辨力的重要因素, 因此在 PG 设计时需考虑这一因素。在图 1 所示系统中, 标记外杂散光、电噪声、零级和相邻偶级次衍射光对测量信号的串扰, 会降低测量信号

的 SNR, 影响系统的测量精度。当 ±m 级衍射光为测量信号时, 系统的 SNR 的定义^[6]为

$$R_{SN} = \frac{\eta_m + \eta_{-m}}{R_e + R_b + R_0 + (R_{m-1} + R_{m+1}) + [R_{-(m-1)} + R_{-(m+1)}]} \quad (6)$$

式中: η_m 和 η_{-m} 为测量光束 ±m 级衍射光的衍射效率; R_e 为电噪声; R_b 为标记区域外的杂散光; R_0 为标记区域内的 0 级杂散光; R_{m-1} , $R_{-(m-1)}$, R_{m+1} 和 $R_{-(m+1)}$ 为测量信号相邻衍射级次的串扰。

由文献 [6] 可得, $R_e = R_b = 0.006\eta_m$, $R_0 = 0.003\eta_0$, $R_{m+1} = 0.003\eta_{m+1}$, $R_{-(m+1)} = 0.003\eta_{-(m+1)}$, $R_{m-1} = 0.003\eta_{m-1}$, $R_{-(m-1)} = 0.003\eta_{-(m-1)}$ 。因为理想光栅的 ±m 级衍射效率相同, 所以测量信号的 SNR 为

$$R_{SN} = \frac{2\eta_m}{0.012\eta_m + 0.003(2\eta_{m-1} + \eta_0 + 2\eta_{m+1})} \quad (7)$$

当测量标记为共振域 PG 时, 系统一般以 ±1 级衍射光作为测量信号光, 不同波长入射光的 SNR 为

$$R_{SN, k} = \frac{2\eta_1}{0.012\eta_1 + 0.003(3\eta_0 + 2\eta_2)}, \quad k = \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n \quad (8)$$

当系统采用多波长照明时, 不同波长下 SNR 取最大值时所对应的光栅的占空比和槽深取值均不相同, 故需要寻找合适的评价函数作为光栅参数设计的依据。为了提高 PG 对多波长的适应性, 本文以多个波长下 1 级衍射光的 SNR 之和为评价函数, SNR 之和 $R_{SN, sum}$ 为

$$R_{SN, sum} = R_{SN, \lambda_1} + R_{SN, \lambda_2} + \dots + R_{SN, \lambda_n} \quad (9)$$

2.2 共振域相位光栅计算模型

共振域 PG 衍射情况复杂, 考虑到光栅周期性结构的特点, 采用严格耦合波法构建共振域 PG 模型^[17]。

PG 标记结构如图 2 所示, 其中 d 为槽深, f 为占空比。X 轴方向垂直于光栅栅线方向, Y 轴方向为光栅栅线方向, Z 轴方向垂直于光栅表面。入射面为 XOZ 面, 与 Z 轴夹角为 σ 的光束入射到 PG 标记上。光栅结构划分为入射/反射区域、透射区域和光栅区域, 其中入射/反射区域的折射率为 n_1 , 透射区域的折射率为 n_2 , 光栅区域的折射率为周期性分布的 n_{rd} 和 n_{gr} ^[11]。

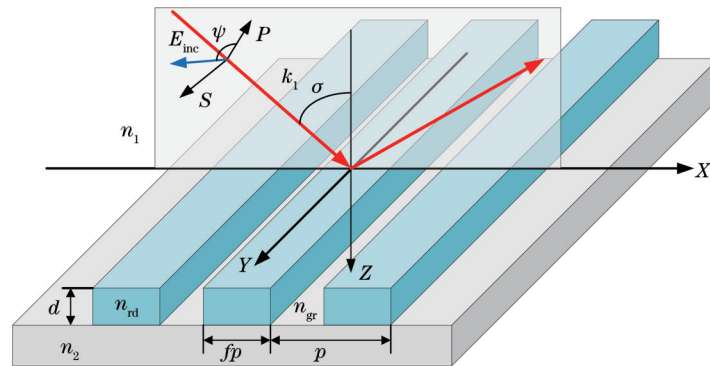


图 2 PG 标记结构示意图
Fig. 2 Structural diagram of PG mark

在光栅区域内, 相对介电常数的傅里叶级数展开为

$$\epsilon(x) = \sum_h \epsilon_h \exp\left(j \frac{2\pi}{p} hx\right), \quad (10)$$

式中: h 为傅里叶展开的级数; ϵ_h 为展开系数, 可表示为

$$\epsilon_h = \begin{cases} n_{rd}^2 f + n_{gr}^2 (1-f), & h=0 \\ \left(n_{rd}^2 - n_{gr}^2\right) \frac{\sin(\pi h f)}{h\pi}, & h \neq 0 \end{cases} \quad (11)$$

在入射区域中, 当以横电 (TE) 偏振光照射光栅时, 电场矢量仅在 Y 方向上存在分量, 该分量可以表示为

$$E_{inc, y} = \exp[-jk_0 n_1 (\sin \sigma x + \cos \sigma z)], \quad (12)$$

式中: $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ 为入射光的波数, 其中 λ_0 为入射光的波长。

入射/反射区域 1 和透射区域 2 的电场分布可分别表示为

$$E_{1, y} = E_{inc, y} + \sum_m R_m \exp[-j(k_{xm} x + k_{l, zm} z)], \quad (13)$$

$$E_{2, y} = \sum_m T_m \exp\{-j[k_{xm} x + k_{2, zm} (z-d)]\}, \quad (14)$$

式中: R_m 和 T_m 分别为归一化的第 m 级电场反射级次和透射级次的振幅。 k_{xm} 为 x 方向的波矢分量

$$k_{xm} = k_0 [n_1 \sin \sigma - m(\lambda_0/p)], \quad (15)$$

$k_{l, zm}$ ($l=1, 2$) 表示 z 方向的波矢分量

$$k_{l, zm} = \begin{cases} (k_0^2 n_l^2 - k_{xm}^2)^{1/2}, & k_{xm}^2 \leq k_l^2 \\ -j(k_{xm}^2 - k_0^2 n_l^2)^{1/2}, & k_{xm}^2 > k_l^2 \end{cases}, \quad (16)$$

式中: k_l 为入射/反射区域 1 和透射区域 2 的波数。

在光栅区域中, 电场和磁场的空间谐波的傅里叶级数展开为

$$E_{gy} = \sum_m S_{ym}(z) \exp(-jk_{xm} x), \quad (17)$$

$$H_{gx} = -j \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{1/2} \sum_m U_{xm}(z) \exp(-jk_{xm}x), \quad (18)$$

式中： ϵ_0 和 μ_0 分别为自由空间的介电常数和磁导率； $S_{ym}(z)$ 和 $U_{xm}(z)$ 分别为第 m 级电场空间谐波和磁场空间谐波的归一化振幅。将式(17)和式(18)代入到麦克斯韦方程组中可得到一组耦合波方程，联立式(10)~(16)与 $z=0$ 和 $z=d$ 处的边界条件，可以求出第 m 级电场反射级次和透射级次的振幅。在微位移测量系统中，使用反射光作为测量信号，第 m 级反射光的衍射效率为

$$\eta_{m,TE} = R_m R_m^* \operatorname{Re} \left(\frac{k_{1,zm}}{k_1 \cos \sigma} \right). \quad (19)$$

当以横磁(TM)偏振光照射光栅时，磁场矢量仅在 Y 方向存在分量。同理，TM偏振态下，PG 标记第 m 级反射光的衍射效率为

$$\eta_{m,TM} = R_m R_m^* \operatorname{Re} \left(\frac{k_{1,zm}}{k_1 \cos \sigma} \right). \quad (20)$$

对于其他偏振情况的入射光，可以分解为 TE 波和 TM 波后单独分析。如图 2 所示，电场方向与入射平面的夹角为 ψ 时，电场矢量可以分解为

$$E_{inc} = \sin \psi \cdot |E_{inc}| \cdot S + \cos \psi \cdot |E_{inc}| \cdot P = E_{inc,TE} + E_{inc,TM}, \quad (21)$$

式中： S 和 P 分为图 2 中 S 方向和 P 方向上的单位矢量。结合上述 TE 和 TM 偏振下的计算过程，当偏振方向为 ψ 的偏振光照射光栅标记时，第 m 级反射光的衍射效率为

$$\eta_{m} = \sin^2 \psi \cdot \eta_{m,TE} + \cos^2 \psi \cdot \eta_{m,TM}. \quad (22)$$

2.3 光栅参数快速求解算法

对于共振域 PG，当入射光偏振态、光栅槽深和占空比研究范围较大时，利用参数遍历确定光栅最佳参数的方法会消耗大量时间。针对本文中参数的优化问题，差分进化算法具有收敛速度快，无需格外参数转换和优化结果良好的优势^[18-20]，故本文采用差分进化算法来对光栅参数进行设计。该算法包括种群初始化和迭代进化两部分，种群初始化完成后进入迭代流程，迭代流程包括变异、交叉和选择三个部分。差分进化算法^[20]将 N_p 个维数为 D 的实数值参数向量作为每一代的种群，每个个体可表示为 $x_{i,G}$ ($i=1, 2, \dots, N_p$)，其中 i 为个体在种群中的序列， G 为进化的代数。

初始化是在给定边界约束的值中随机选择值来作为初始种群。当参数的界限为 $x_j^l < x_j < x_j^u$ 时，则

$$x_{j,0} = \operatorname{rand}[0, 1] (x_j^u - x_j^l) + x_j^l, \quad j = 1, 2, \dots, D, \quad (23)$$

式中： $\operatorname{rand}[0, 1]$ 表示在 $[0, 1]$ 之间产生的均匀的随机数。

在变异操作中，对于每个目标向量 $x_{i,G}$ ，差分进化算法的变异产生的表达式为

$$v_{i,G+1} = x_{r_1,G} + F(x_{r_2,G} - x_{r_3,G}), \quad (24)$$

式中：随机选择的序号 r_1, r_2 和 r_3 与目标序号 i 互不相

同；变异算子 $F \in [0, 2]$ 为一个实常数因数，其可控制偏差变量的放大作用。

交叉操作是为了增加干扰参数向量的多样性，试验向量为

$$u_{i,G+1} = (u_{1i,G+1}, u_{2i,G+1}, \dots, u_{Di,G+1}), \quad (25)$$

$$u_{ji,G+1} = \begin{cases} v_{ji,G+1}, & \operatorname{randb}(j) \leq C_R \text{ or } j = \operatorname{rnbr}(i) \\ x_{ji,G+1}, & \operatorname{randb}(j) > C_R \text{ and } j \neq \operatorname{rnbr}(i) \end{cases} \quad (26)$$

式中： $\operatorname{randb}(j)$ 为产生 $[0, 1]$ 之间随机数发生器的第 j 个估值； $\operatorname{rnbr}(i) \in \{1, 2, \dots, D\}$ 为随机选择的序列； C_R 为交叉算子，其取值范围为 $[0, 1]$ 。

对于存在边界约束的问题，若产生的新个体超出定义域，即 $u_{ji,G+1} < x_j^l$ 或 $u_{ji,G+1} > x_j^u$ ，则需要进行边界条件处理，即

$$u_{ji,G+1} = \operatorname{rand}[0, 1] (x_j^u - x_j^l) + x_j^l. \quad (27)$$

选择操作将决定试验向量 $u_{i,G+1}$ 是否会成为下一代成员，该算法中按照贪婪准则将试验向量和当前种群中的目标向量 $x_{i,G}$ 进行比较，更满足目标函数值要求的向量将在下一代种群中出现。

综上所述，基于差分进化算法研究光栅最佳参数的流程如图 3 所示。首先，根据槽深和占空比研究范围随机选取出 N_p 组数据作为初始种群。然后，根据式(24)~(27)对每个个体进行变异交叉和边界条件处理等操作。在计算目标函数操作中将个体中槽深、占空比参数代入 2.1 节的公式中，计算出评价函数。将该评价函数作为算法中的目标函数对个体进行选择。重复上述迭代循环到最大进化代数后，输出最优参数和目标函数值。

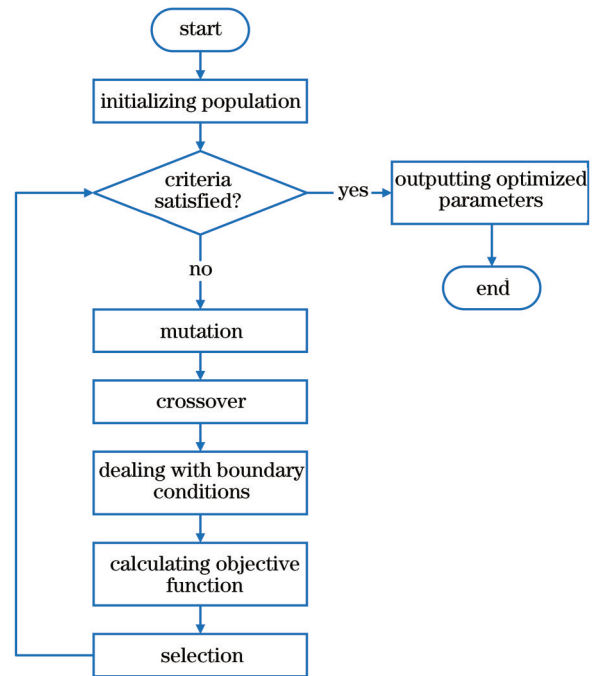


图 3 差分进化算法流程图

Fig. 3 Flow chart of differential evolution algorithm

3 仿真实验

为验证所提的严格耦合波法与差分进化算法结合的光栅设计方法的有效性,采用一典型多波长 PG 测量模型进行验证,该系统有 4 个测量波长,分别为 532、633、780、852 nm。4 个波长有三种可选择的偏振态,分别为 TE 偏振、TM 偏振和圆偏振。PG 标记的材料为晶体硅,4 个波长所对应材料的折射率和吸收系数如表 1^[6]所示。参考标量衍射理论,当槽深为 1/4 波长时,1 级衍射效率最大,故槽深的研究范围为 100~240 nm,将占空比的研究范围设置为 0~1。

3.1 空间谐波数的确定

由 2.2 节可知,光栅区域内电场和磁场傅里叶展开的空间谐波数直接影响严格耦合波法的计算精度,空间谐波数越多,计算结果越精确,但会增加计算量和计算时间,故需要选择合适的空间谐波数。结合文献[11]可知,光栅槽深越深需要的空间谐波数越多,且光

表 1 光栅材料参数

Table 1 Grating material parameters

Incident wavelength / nm	Real refractive index	Extinction coefficient
532	4.1500	0.043947
633	3.8812	0.018932
780	3.7093	0.007481
852	3.6611	0.004707

栅周期、入射光波长和偏振态等参数也会对空间谐波数的取值产生影响。

针对共振域 PG 标记,在 532、633、780、852 nm 4 个波长和 TE、TM 两种偏振态下,研究 AA5(周期为 3.2 μm)、AA7(周期为 2.3 μm)和 AA10(周期为 1.6 μm)三个 PG 标记(占空比为 0.5,槽深为 240 nm)的 1 级衍射效率收敛情况与空间谐波数的关系,研究结果如图 4 所示。

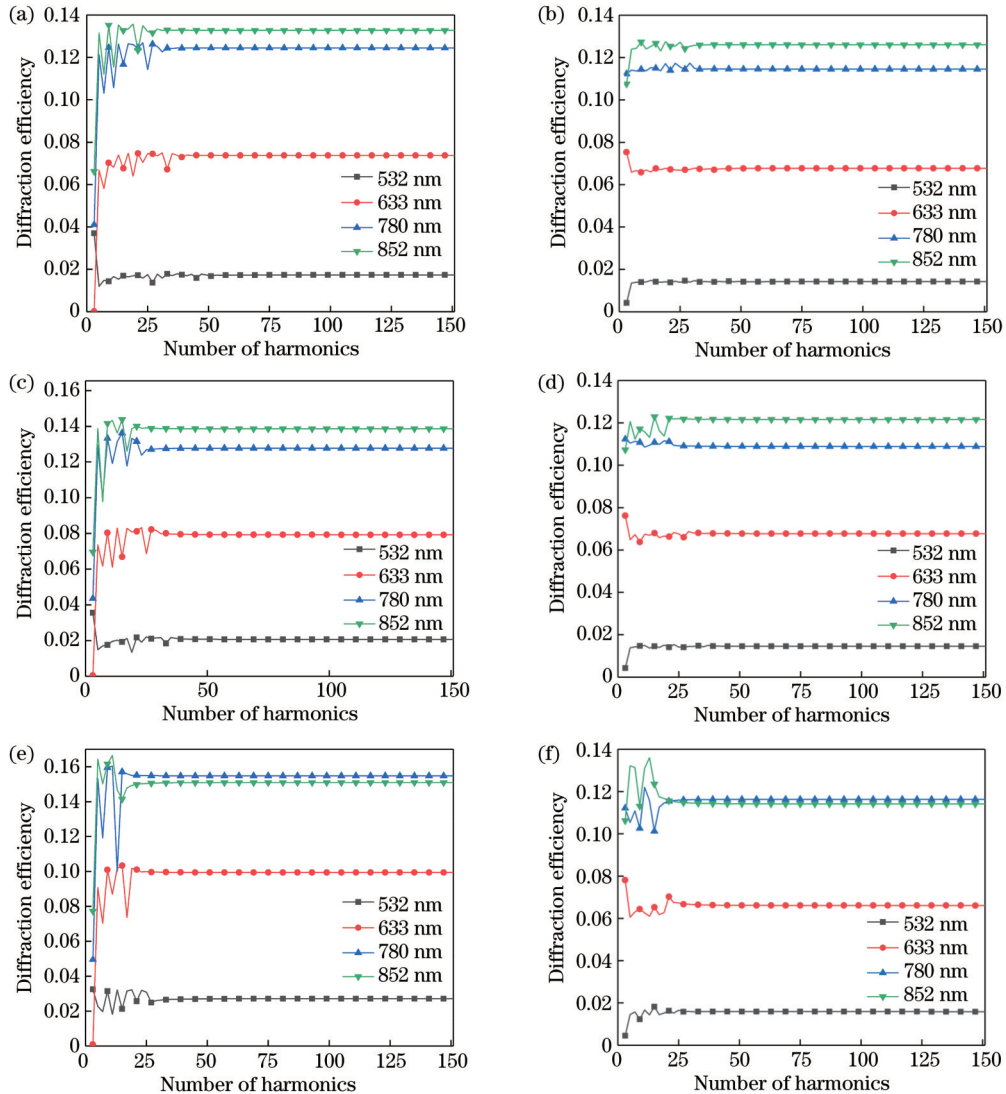


图 4 两种偏振态下不同谐波数下的 1 级衍射效率。(a) AA5-TE; (b) AA5-TM; (c) AA7-TE; (d) AA7-TM; (e) AA10-TE; (f) AA10-TM

Fig. 4 First diffraction efficiency under different harmonic numbers in two polarization states. (a) AA5-TE; (b) AA5-TM; (c) AA7-TE; (d) AA7-TM; (e) AA10-TE; (f) AA10-TM

由图 4 可知,在入射波长确定的情况下,当光栅周期处于共振域时,光栅衍射情况比较复杂。在入射光波长和光栅周期确定的情况下,入射光偏振态不同,计算结果收敛需要的谐波数不同。在入射光波长和偏振态确定的情况下,光栅周期越大,计算结果收敛需要的谐波数越多。在入射光偏振态和光栅周期确定的情况下,入射光波长越小,计算结果收敛需要的谐波数越多。因此,针对特定系统,在入射光偏振态确定的情况下,最佳空间谐波数可由系统的最小入射波长、最大光栅周期和最深槽深三个参数确定。

对于本文中拟分析的多波长微位移测量系统,测量标记周期为 $3.2\ \mu\text{m}$,最小入射波长为 $532\ \text{nm}$,最深槽深为 $240\ \text{nm}$ 。由图 4(a)、(b)可知,两种偏振态下 1 级衍射效率在空间谐波数量大于 61 时计算结果收敛,综合考虑计算精度和计算时间,最佳空间谐波数量取为 61。

3.2 相位光栅最佳参数的确定

由式(11)、式(14)和式(22)可得,光栅占空比、槽深和入射光的偏振态是影响光栅衍射效率的重要因素,基于 2.1 节中的评价函数,求解 SNR 之和最大时的光栅参数。本文提出了严格耦合波法与差分进化算法相结合的共振域 PG 标记设计方法,并将该方法开发成相关的程序。该程序的输入参数为空间谐波数、入射光波长、入射光偏振态、光栅周期、光栅材料参数、槽深的取值范围、占空比的取值范围、评价函数的参数和差分进化算法的参数。该程序的输出参数为评价函数的收敛曲线、光栅最佳占空比和槽深。

综合考虑 3.2 、 2.3 、 $1.6\ \mu\text{m}$ 周期的 PG 的使用广泛性,选择使用最广泛的 $3.2\ \mu\text{m}$ 周期的 PG 标记进行设计^[10,15]。设置差分进化算法的参数为:变量维数为 $D=2$ (光栅占空比和槽深),个体数目为 $N_p=20$,最大进化代数为 $G=100$,变异算子为 $F=0.5$,交叉算子为 $C_r=0.1$ 。

利用所开发的程序,得到了如图 5 所示的三种偏振态下 SNR 之和随迭代次数的收敛曲线,当迭代次数为 25 时,三种偏振态下 SNR 之和趋于稳定,基本达到最大值。三种偏振态下对应光栅的最佳参数如表 2 所

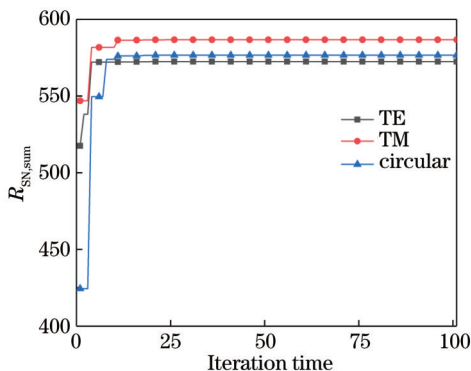


图 5 差分进化算法下 SNR 之和和迭代结果

Fig. 5 Iterative results of sum of signal-to-noise ratios under differential evolution algorithm

示,对于 $3.2\ \mu\text{m}$ 周期的 PG,应选择 TM 光照射,光栅占空比取 0.484 ,槽深取 $161.5\ \text{nm}$,此时 SNR 之和可达到最大值 586.63 。

表 2 三种偏振态下光栅最佳参数
Table 2 Optimum parameters of grating under three polarization states

Polarization	$R_{\text{SN,sum}}$	Duty cycle	Depth /nm
TE	572.39	0.466	170.0
TM	586.63	0.484	161.5
Circular	576.59	0.474	165.5

为验证所提光栅设计方法的快速性,使用常规的参数遍历方法研究了 $3.2\ \mu\text{m}$ 周期的光栅的最佳参数,结果如图 6 所示,该方法确定的 PG 标记最佳参数与表 2 数据一致。然而,所提设计方法的计算时间约为参数遍历光栅设计方法计算时间的 0.2% ,表明所提方法大大提高了 PG 标记的设计效率。

为进一步验证利用所提方法设计出的光栅的性能,将其与基于标量衍射理论的设计方法设计出的光栅进行了对比,如表 3 所示。常规设计方法的结果为:圆偏振光照明、光栅占空比为 0.5 、槽深为 $1/4$ 波长,分别用 Grating_532、Grating_633、Grating_780 和 Grating_852 表示,所提方法设计的光栅用 Grating_Opt 表示。由表 3 可知,所提方法设计出的光栅比常规方法设计出的光栅的 SNR 之和最大提升比例可达到 24.4% 。

表 3 不同光栅参数下的 SNR 之和

Table 3 Sum of signal-to-noise ratios under different grating parameters

Grating	Duty cycle	Depth /nm	Polarization	$R_{\text{SN,sum}}$	Increase ratio /%
Grating_532	0.500	133.00	Circular	507.03	15.7
Grating_633	0.500	158.25	Circular	569.00	3.1
Grating_780	0.500	195.00	Circular	528.57	11.0
Grating_852	0.500	213.00	Circular	471.47	24.4
Grating_Opt	0.484	161.50	TM	586.63	

4 结 论

针对高精度微位移测量需求,提出了一种严格耦合波法与差分进化算法相结合的共振域 PG 标记设计方法。基于自参考干涉位移模型,确定了以测量光 SNR 之和为光栅标记设计的评价函数,分析了共振域 PG 计算模型和光栅参数快速求解算法。同时,研究了不同入射光波长、偏振态和光栅周期下,严格耦合波法中空间谐波数与计算精度的关系。在入射光偏振态确定的情况下,最佳谐波数由系统的最小入射波长、最大光栅周期和最深槽深三个参数确定。针对多波长照明微位移测量需求,利用所提方法开发的程序进行了标记设计。结果表明,对于 $3.2\ \mu\text{m}$ 周期的 PG 标记,TM 光照射时光栅占空比取 0.484 ,槽深取 $161.5\ \text{nm}$,此时

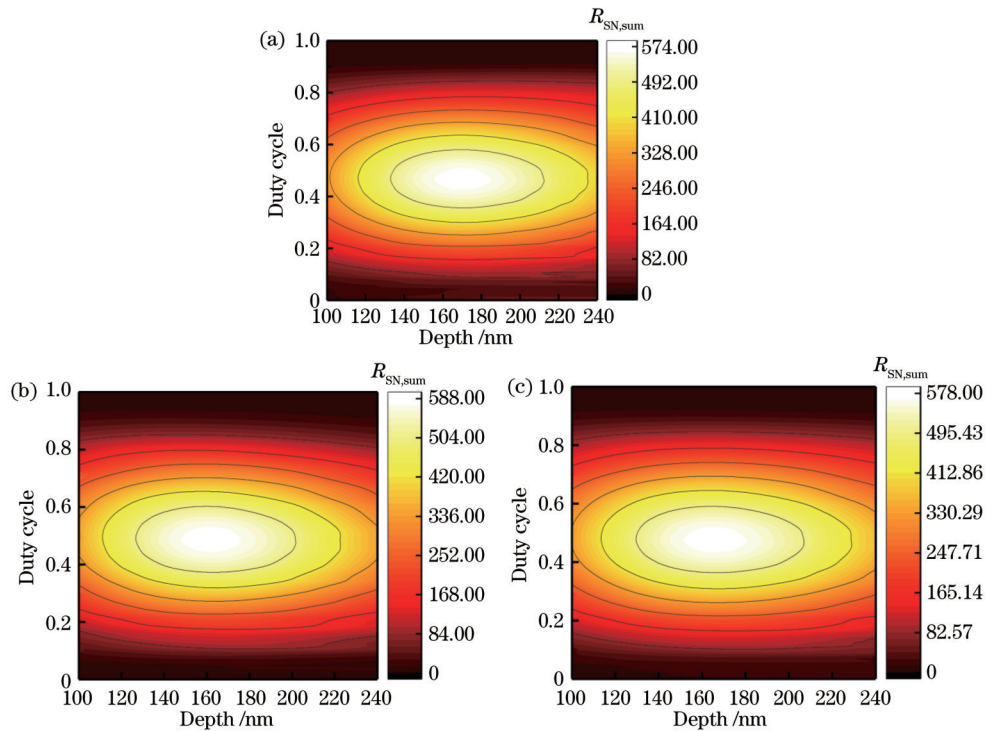


图 6 三种偏振态下 $3.2 \mu\text{m}$ 周期的光栅的 SNR 之和。(a) TE 偏振;(b) TM 偏振;(c) 圆偏振

Fig. 6 Sum of signal-to-noise ratios of grating with period of $3.2 \mu\text{m}$ in three polarization states. (a) TE polarization; (b) TM polarization; (c) circular polarization

SNR 之和可达到最大值 586.63。较常规设计方法,所提方法设计光栅标记的时间缩短到了其的 0.2%,所设计光栅的 SNR 之和最大提升比例可达到 24.4%,验证了所提设计方法的有效性。

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] 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.
- [3] 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.
- [4] 赵华君. 亚波长光栅光学[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2017.
Zhao H J. *Subwavelength grating optics*[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2017.
- [5] 高华. 位相光栅衍射偏振特性的研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2007: 55-62.
Gao H. *Study on diffraction polarization characteristics of phase grating*[D]. Beijing: Beijing Normal University, 2007: 55-62.
- [6] 杜聚有. 基于位相衍射光栅的投影光刻机对准技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2019: 80-87.
Du J Y. *Study on alignment techniques based on phase diffraction grating for projection lithography tools*[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019: 80-87.
- [7] 杨光华, 王宇, 李璟, 等. 相位光栅非对称性对位置测量精度的影响[J]. *光学学报*, 2021, 41(19): 1905001.
Yang G H, Wang Y, Li J, et al. Effect of phase grating asymmetry on position measurement accuracy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(19): 1905001.
- [8] 杨光华, 王宇, 李璟, 等. 增强型相位光栅衍射效率研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(12): 1205001.
Yang G H, Wang Y, Li J, et al. Diffraction efficiency of enhanced phase grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(12): 1205001.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Moharam M G, Gaylord T K, Grann E B, et al. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1995, 12(5): 1068-1076.
- [12] 王斌, 郝鹏, 吴一辉, 等. 基于修正简化模式法的熔融石英光栅分束器设计[J]. *光学学报*, 2014, 34(7): 0723004.
Wang B, Hao P, Wu Y H, et al. Fused-silica beam splitter grating design based on modified simplified modal method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0723004.

- [13] 魏张帆, 胡敬佩, 张冲, 等. 基于全介质共振域光栅的偏振器件设计与制备[J]. 中国激光, 2020, 47(12): 1201005.
Wei Z F, Hu J P, Zhang C, et al. Design and fabrication of polarizer based on all-dielectric resonance-domain grating[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(12): 1201005.
- [14] Hoshino T, Banerjee S, Itoh M, et al. Design of a wavelength independent grating in the resonance domain [J]. Applied Optics, 2007, 46(32): 7942-7956.
- [15] 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.
- [16] 徐孟南, 卢增雄, 齐月静, 等. 光束偏振对自参考干涉信号对比度的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(23): 2326002.
Xu M N, Lu Z X, Qi Y J, et al. Influence of beam polarization on contrast of self-referencing interference signal[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(23): 2326002.
- [17] 巴音贺希格. 衍射光栅色散理论与光栅设计、制作和检验方法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2004: 7-20.
Bayanheshig. The study on the dispersion theory, design, manufacture, and efficiency test of diffraction gratings[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2004: 7-20.
- [18] Fuehner T, Erdmann A, Schnattinger T. Genetic algorithms for geometry optimization in lithographic imaging systems[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5558: 29-40.
- [19] 王磊, 李思坤, 王向朝, 等. 基于粒子群优化算法的光刻机光源掩模投影物镜联合优化方法[J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1022001.
Wang L, Li S K, Wang X Z, et al. Source mask projector optimization method of lithography tools based on particle swarm optimization algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1022001.
- [20] 茅言杰, 李思坤, 王向朝, 等. 基于差分进化算法的光刻机匹配方法[J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1222002.
Mao Y J, Li S K, Wang X Z, et al. Lithographic tool-matching method based on differential evolution algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1222002.