

嵌入式光栅多层结构锥形衍射的严格耦合波理论研究

杨 亮, 李艳秋, 马 旭, 盛乃援

(北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘要: 基于严格耦合波分析理论, 将嵌入式光栅多层结构平面衍射的理论模型扩展至锥形衍射的情况, 可以模拟具有任意波长、偏振态、方位角和入射角的平面波入射该多层结构后形成的衍射。在此基础上, 研究了微机械声光传感器锥形衍射中+1级光衍射效率的收敛性。仿真表明: TM (Transverse Magnetic) 偏振光入射且光栅周期为 $4\ \mu\text{m}$ 时, 当谐波数 $M(2n+1)$ 分别为 67、69、71 时, +1 级光衍射效率分别为 28.86%、28.84%、28.86%, 收敛性较好。另外, 优化了微机械声光传感器的位移灵敏度, 当入射角为 22° 、方位角为 10° 、光栅周期为 $1\ \mu\text{m}$ 时, 与周期为 $4\ \mu\text{m}$ 的+1级衍射光相比, TE、TM 偏振光入射时 0、+1 级衍射光的位移灵敏度均提高一倍, 可以准确地监测该传感器中声压或驱动电压引起的金属膜的位移。

关键词: 严格耦合波法; 亚波长光栅; 多层结构; 锥形衍射

中图分类号: O436; TN214 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)06-1899-06

Rigorous coupled wave analysis of grating-embedded multilayer structure conical diffraction

Yang Liang, Li Yanqiu, Ma Xu, Sheng Naiyuan

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on rigorous coupled wave analysis, the models for grating-embedded multilayer structure planar diffraction were generalized to the case of conical diffraction. The proposed method can be used to calculate the light diffracted from the grating-embedded multilayer structure with arbitrary wavelength, polarization, azimuthal angle and incident angle. For the micromachined optoacoustic sensor, the convergence performance of the diffraction efficiencies of the reflected +1st order in conical diffraction was investigated. The simulations show that using a $4\ \mu\text{m}$ grating period and TM (Transverse Magnetic) polarization, when the numbers of harmonics $M(2n+1)$ are 67, 69 and 71, the diffraction efficiencies of the +1st order are 28.86%, 28.84% and 28.86%, respectively. Then the displacement sensitivity of the micromachined optoacoustic sensor was optimized. When the incident angle, the azimuthal angle and the grating period are 22° , 10° and $1\ \mu\text{m}$, respectively, compared with the +1st diffracted orders of $4\ \mu\text{m}$ grating period, the displacement sensitivity of the 0th and +1st orders under TE and TM polarization was

收稿日期: 2013-10-14; 修订日期: 2013-11-15

基金项目: 国家自然科学基金重点项目; 国家中长期科技重大专项(F050809/60938003)

作者简介: 杨亮(1984-), 男, 博士生, 主要从事微纳光学方面的研究工作。Email: yangliang_BIT@163.com

导师简介: 李艳秋(1962-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事精密光学和微纳技术方面的研究工作。Email: liyanqiu@bit.edu.cn

nearly doubled. It can be used to accurately monitor the metal membrane displacement induced by the acoustic pressure or electrostatic actuation voltage.

Key words: rigorous coupled wave analysis; sub-wavelength grating; multilayer structure; conical diffraction

0 引言

随着光栅特征尺寸的不断减小(波长、亚波长量级)和浮雕深度的不断增加(数个波长),标量衍射理论不再成立,必须采用严格的矢量理论来模拟光栅的衍射^[1-2]。严格矢量衍射理论主要包括积分法、微分法、模式法和耦合波法(RCWA)等^[3-4]。前两种方法虽然可以得到精确的结果,但需要复杂的数值计算,难以理解和实现;后两种方法都在光栅区将电磁场展开,不同的是模式法将电磁场按模式展开,而耦合波法将电磁场按衍射级次展开^[5]。RCWA 具有理论公式及计算简单、物理概念明了和通用性强等特点,所以文中采用严格耦合波法来模拟嵌入式光栅多层结构的锥形衍射。

RCWA 方法被广泛用于模拟光栅的衍射,解的精度取决于电磁场展开时保留的谐波数。1981年, Moharam 和 Gaylord 首次提出了 RCWA 方法来分析平板光栅的衍射^[6]。1995年, Moharam 等提出了计算二元光栅时更稳定、更有效的矩阵公式^[7],但仅分析了单个光栅层的衍射。随后他们又提出了增强透射矩阵法,采用多层近似的方法来模拟分析任意型表面浮雕光栅的衍射^[8],但在分析 TM 偏振光入射金属光栅时收敛性变差^[9]。之后严格耦合波方法取得迅速发展, Song Peng 等在用严格耦合波方法分析表面浮雕光栅的衍射时,提出了一种求解特征值的新方法^[10]。1996年, Lalanne 提出了一种改善严格耦合波理论收敛性的方法^[11],用介电常数倒数的 Fourier 分量形成的 Toeplitz 矩阵的逆矩阵来代替原来的 Toeplitz 矩阵,改善了计算有损光栅衍射时的收敛性,但其仅用于分析单层光栅的衍射,该公式虽然是 Lalanne 提出的经验解,但也严格遵守了 Li 公式^[12]。2004年, Lee 采用 RCWA 分析嵌入式光栅多层结构的衍射,其中有任意个均匀的电介质或金属层,光栅层位于任意位置,但该模型仅能分析方位角为 0 的情况,即平面衍射^[13]。

文中将嵌入式光栅多层结构平面衍射的理论模型扩展至锥形衍射,该模型也可分析具有多个光栅层的多层结构的锥形衍射。然后分析了微机械声光传感器锥形衍射中反射衍射光衍射效率的收敛性。最后采用建立的模型设计优化了微机械声光传感器的位移灵敏度。

1 理论模型

嵌入式光栅多层结构的横截面如图 1 所示^[13],该结构主要由 N 个电介质或金属层组成,光栅层位

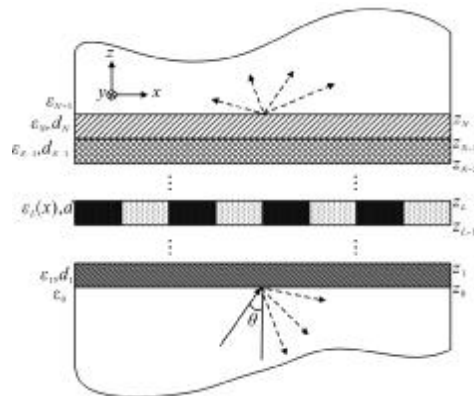


图 1 嵌入式光栅多层结构的横截面示意图

Fig.1 Schematic of cross section of grating-embedded multilayer structure

于任意位置。光栅周期方向,即光栅矢量,沿着 x 轴的方向。栅条沿着 y 轴的方向且无限延伸, x 、 y 轴组成的平面为光栅平面,其法向为 z 轴,且 x 、 y 、 z 满足右手定则。第 l 个均匀层位于区域 $z_{l-1} < z < z_l$, 厚度为 $d_l = z_l - z_{l-1}$, 相对介电常数为 ϵ_l 。光栅层 ($l=L$) 相对介电常数为 $\epsilon_l(x)$, 在 x 轴上的周期为 Λ , 占空比为 f 。 $z < z_0$ 为入射区, $z > z_N$ 为出射区, 介电常数分别为 ϵ_0 、 ϵ_{N+1} , 且它们沿着 z 轴的负向、正向分别是无限扩展的。一束单位幅值的线偏光以角度 θ (波矢量与 z 轴的夹角) 入射在该多层结构上发生衍射, 波矢量与 z 轴构成的平面为入射平面。方位角 φ 为波矢量在光栅平面上的投影与 x 轴之间的夹角。电场矢量与入射平面夹角为 Ψ , $\Psi=90^\circ$ 为 TE (Transverse Electric) 偏振,

$\Psi=0^\circ$ 为 TM 偏振。

入射区 ($z < z_0; l=0$)、出射区 ($z > z_N; l=N+1$)、第 l 个均匀层 ($z_{l-1} < z < z_l; l=1, 2, \dots, N-1, N$ 且 $l \neq L$) 及光栅层 $l=L$ 的电场可以表示为:

$$E_0 = \sum_m \{u \delta_{m0} \exp[-ik_0 q_{0,m}(z-z_0)] + B_{0,m} \exp[ik_0 q_{0,m}(z-z_0)]\} \times \exp[-i(k_{xm}x + k_y y)] \quad (1)$$

$$E_{N+1} = \sum_m A_{N+1,m} \exp[-ik_0 q_{N+1,m}(z-z_N)] \times \exp[-i(k_{xm}x + k_y y)] \quad (2)$$

$$E_l = \sum_m \{A_{l,m} \exp[-ik_0 q_{l,m}(z-z_l)] + B_{l,m} \exp[ik_0 q_{l,m}(z-z_l)]\} \times \exp[-i(k_{xm}x + k_y y)] \quad (3)$$

$$E_L = \sum_m [S_{L,xm}(z)x + S_{L,ym}(z)y + S_{L,zm}(z)z] \times \exp[-i(k_{xm}x + k_y y)] \quad (4)$$

式中: δ_{m0} 为克罗内克尔函数, 当 $m=0, \delta_{m0}=1, m \neq 0, \delta_{m0}=0$; k_0 为真空中的波数; i 为虚数单位; $A_{l,m}$ 和 $B_{l,m}$ 分别表示第 l 层中第 l 级光向 z 轴正向、负向传播波的矢量振幅值; $S_{L,m}$ 为光栅层中电场第 m 个空间谐波场归一化的矢量振幅值; $k_{xm}, k_y, q_{l,m}$ 及 u 等参数的具体含义参见参考文献[7,13]。

为了改善 RCWA 的收敛性, 光栅区的耦合波方程表示为^[11]:

$$[\partial^2 U_{L,x} / \partial (z')^2] = [K_y^2 + K_x^2 - E_L][U_{L,x}] = F_L[U_{L,x}]$$

$$[\partial^2 S_{L,x} / \partial (z')^2] = [K_x E_L^{-1} K_x - I] \bar{E}_L + K_y^2 [S_{L,x}] = G_L[S_{L,x}] \quad (5)$$

式中: \bar{E}_L, K_x, K_y, E_L 均为 $M \times M$ 的矩阵 ($M=2n+1, n$ 为电磁场展开时保留的谐波数); K_x, K_y 为对角矩阵, 对角元素 (m,m) 分别为 $k_{xm}/k_0, k_y/k_0$; E_L 为光栅层介电常数的谐波分量组成的 Toeplitz 矩阵, 其元素 (m,j) 等于 $\varepsilon_{L,(m-j)}$; \bar{E}_L 为光栅层介电常数倒数的谐波分量组成的 Toeplitz 矩阵, 其元素 (m,j) 等于 $\bar{\varepsilon}_{L,(m-j)}$; $\varepsilon_{L,(m-j)}$ 和 $\bar{\varepsilon}_{L,(m-j)}$ 为光栅层介电常数、介电常数倒数的 Fourier 分量。

在各区域的交界面上, 利用电磁场切向分量连续的特性可以推导出各层的传播矩阵 (Propagation matrix)、动态矩阵 (Dynamic matrix)。第 l 层的传播矩

阵 $P_l (l=1, 2, \dots, N-1, N)$ 可表示为:

$$P_l = \begin{bmatrix} X_{l,1}^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X_{l,2}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X_{l,1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X_{l,2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: 子矩阵 $X_{l,1}$ 和 $X_{l,2}$ 均为第 l 层的对角矩阵。对于光栅层来说 ($l=L$), $X_{l,1}, X_{l,2}$ 的对角元素分别为 $\exp(-k_0 q_{l,1m} d_l), \exp(-k_0 q_{l,2m} d_l), q_{l,1m}, q_{l,2m}$ 分别为特征矩阵 F_l, G_l 特征值的正平方根。对于均匀层来说 ($l \neq L$), 则有 $X_{l,1} = X_{l,2}$, 且对角元素为 $\exp(-ik_0 q_{l,m} d_l)$ 。

根据公式 (1)-(4) 及参考文献 [7] 中的公式 (61)-(64), 可以推导出第 l 个均匀层 ($l=0, 1, \dots, N, N+1$ 且 $l \neq L$) 及光栅层 ($l=L$) 的动态矩阵 D_l 和 D_L , 分别表示为:

$$D_l = \begin{bmatrix} I & 0 & I & 0 \\ 0 & I & 0 & I \\ -\frac{K_x K_y}{Y_l} & -\frac{K_y^2}{Y_l} - Y_l & \frac{K_x K_y}{Y_l} & \frac{K_y^2}{Y_l} + Y_l \\ Y_l + \frac{K_x^2}{Y_l} & \frac{K_x K_y}{Y_l} & -Y_l - \frac{K_x^2}{Y_l} & -\frac{K_x K_y}{Y_l} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$D_L = \begin{bmatrix} 0 & W_{L,2} & 0 & W_{L,2} \\ V_{L,11} & V_{L,12} & V_{L,11} & V_{L,12} \\ iW_{L,1} & 0 & -iW_{L,1} & 0 \\ iV_{L,21} & iV_{L,22} & -iV_{L,21} & -iV_{L,22} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: Y_l 为对角矩阵, 对角元素为 $q_{l,m}$; 矩阵 $W_{L,1}, W_{L,2}$ 分别为特征矩阵 F_L, G_L 的特征矢量矩阵; 矩阵 $V_{L,11}, V_{L,12}, V_{L,21}, V_{L,22}$ 的具体含义如参考文献 [7] 中所述。

利用边界条件和增强透射矩阵法可以获得形如参考文献 [13] 中公式 (13)-(16) 所示的方程, 进而求解得到透射场、反射场各级衍射光的幅值, 其中 $\Delta = [u_x \delta_{m0}; u_y \delta_{m0}]$, $B_0 = [B_{0,x}; B_{0,y}]$, $A_{N+1} = [A_{N+1,x}; A_{N+1,y}]$, u_x, u_y 分别为单位偏振矢量 u 在 x, y 轴上的分量, $B_{0,x}, B_{0,y}$ 分别为 B_0 在 x, y 轴上的分量, $A_{N+1,x}, A_{N+1,y}$ 分别为 A_{N+1} 沿着 x, y 轴的分量。

反射场、透射场第 m 级衍射光的衍射效率表示为:

$$DE_0(m) = |B_{0,m}|^2 \operatorname{Re} \left(\frac{q_{0,m}}{n_0 \cos \theta} \right) \quad (9)$$

$$DE_{N+1}(m) = |A_{N+1,m}|^2 \operatorname{Re}\left(\frac{q_{N+1,m}}{n_0 \cos\theta}\right) \quad (10)$$

2 数值仿真结果

利用建立的嵌入式光栅多层结构锥形衍射的理论模型,计算了参考文献[13]中微机械声光传感器的衍射,该传感器主要包括基底、铝电极、空气间隙和铝膜,形成了相位敏感的衍射光栅。在铝膜与铝电极之间加上驱动电压 V ,当声压或电压 V 变化时,铝膜发生位移,空气间隙发生变化,则各级反射衍射光的光强也发生相应的变化。详细的参数为:入射光波长 $\lambda_0=0.85 \mu\text{m}$,铝膜折射率 $n=1.99-i7.05$,铝膜层厚度为 $1.2 \mu\text{m}$,铝光栅厚度为 $0.3 \mu\text{m}$,占空比为 0.5,基底折射率为 1.5。

首先计算了 TE、TM 偏振光入射时,微机械声光传感器的平面衍射中,第+1 级反射衍射光衍射效率随着谐波数的变化关系,其中空气间隙为 $1.6 \mu\text{m}$,金属铝光栅的周期分别为 $4 \mu\text{m}$ 和 $2 \mu\text{m}$ 。计算结果如图 2 所示,与参考文献[13]中图 6 的结果完全一致。然后计算了铝光栅周期分别为 $4 \mu\text{m}$ 和 $2 \mu\text{m}$ 时,TE、TM 偏振光正入射时,0、+1 级衍射光的衍射效率随着空气间隙的变化关系,与参考文献[13]中图 3、图 4 的结果完全一致,同时也证明了所建立理论模型的正确性。

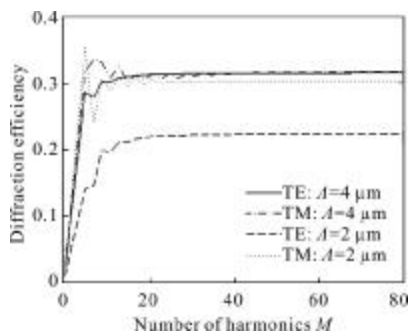


图 2 TE、TM 偏振正入射时第+1 级反射衍射光衍射效率随着谐波数的变化关系(空气间隙为 $1.6 \mu\text{m}$)

Fig.2 Simulated diffraction efficiencies of reflected positive +1st order versus the number of harmonics for vertical incidence of both TE and TM polarizations (Gap thickness is $1.6 \mu\text{m}$)

接着研究了微机械声光传感器的锥形衍射中,第+1 级反射衍射光衍射效率的收敛性,其中入射角 $\theta=10^\circ$,方位角 $\varphi=30^\circ$,空气间隙为 $1.6 \mu\text{m}$ 。计算结果

如图 3 所示, TM 偏振光入射且光栅周期为 $4 \mu\text{m}$ 时, +1 级衍射光衍射效率收敛性较差,当谐波数达到 67 以上时能得到更好的收敛值。当谐波数 $M(M=2n+1)$ 分别为 67、69、71 时,第+1 级衍射光衍射效率分别为 28.86%、28.84%、28.86%。下文计算时,为了保证结果的准确性,选择谐波数 $M=81$ 。

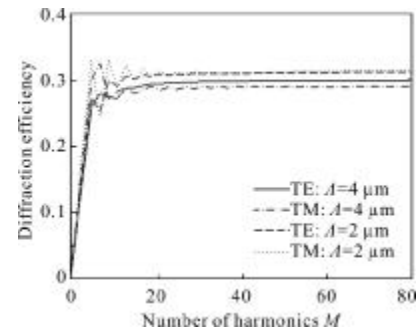


图 3 TE、TM 偏振斜入射时($\theta=10^\circ$)反射场中第+1 级光衍射效率随着谐波数的变化关系(空气间隙为 $1.6 \mu\text{m}$)

Fig.3 Simulated diffraction efficiencies of reflected positive +1st order versus the number of harmonics for oblique incidence of both TE and TM polarizations ($\theta=10^\circ$) (Gap thickness is $1.6 \mu\text{m}$)

在微机械声光传感器中,各级反射衍射光衍射效率随着空气间隙变化曲线的斜率就表示该传感器的位移灵敏度,即金属膜发生单位位移时,所引起的衍射光强度的变化量。这里采用嵌入式光栅多层结构锥形衍射的理论模型来设计、优化该传感器的位移灵敏度。分别计算了 TE、TM 偏振光入射时,第 0、+1 级反射衍射光的衍射效率随着入射角、方位角和空气间隙的变化关系。这里仅给出 TE 偏振光入射时,第 0 级反射衍射光的衍射效率随着入射角和空气间隙变化的等高线图(图 4),及 TM 偏振光入射时,第 0 级反射衍射光的衍射效率随着方位角和空气间隙变化的等高线图(图 5)。图 4 中设定方位角为 0° ,可以看到入射角 θ 为 22° 时,空气间隙从 $1 \mu\text{m}$ 增加至 $2 \mu\text{m}$,第 0 级衍射光出现了 4 个峰值,0 级衍射光的衍射效率对金属膜位移的变化最敏感。图 5 中设定入射角为 10° ,可以看到方位角 φ 为 10° 时,空气间隙从 $1 \mu\text{m}$ 增加至 $2 \mu\text{m}$,第 0 级衍射光出现了 3 个峰值,第 0 级衍射光的衍射效率对金属膜位移的变化也较为敏感。经过比较分析,最终选择入射角为 $\theta=22^\circ$,方位角为 $\varphi=10^\circ$,此时该传感器的 0、+1 级反射衍射光衍射效率对金属

膜位移的变化最敏感。

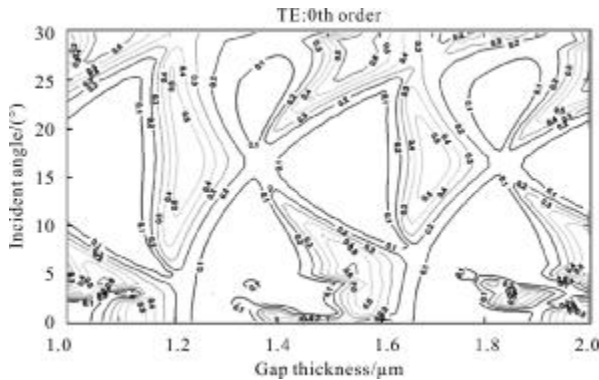


图 4 TE 偏振光入射时第 0 级反射衍射光的衍射效率随着入射角和空气间隙变化的等高线($\varphi=0^\circ, \Lambda=1 \mu\text{m}$)

Fig.4 Contour map of diffraction efficiencies of reflected 0th order versus incident angle and gap thickness for TE polarization with $\varphi=0^\circ$ and $\Lambda=1 \mu\text{m}$

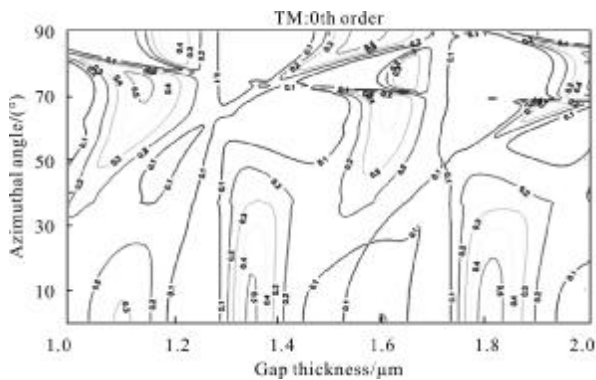
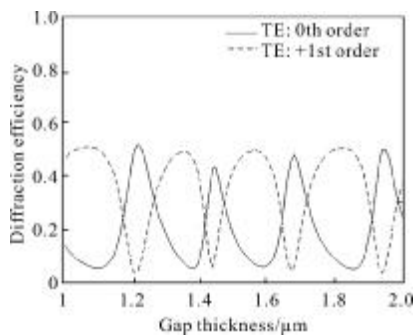


图 5 TM 偏振光入射时第 0 级反射衍射光的衍射效率随着方位角和空气间隙变化的等高线($\theta=10^\circ, \Lambda=1 \mu\text{m}$)

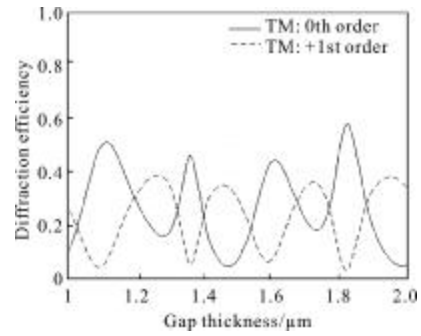
Fig.5 Contour map of diffraction efficiencies of reflected 0th order versus azimuthal angle and gap thickness for TM polarization with $\theta=10^\circ$ and $\Lambda=1 \mu\text{m}$

图 6 为 $\theta=22^\circ, \varphi=10^\circ$ 和 $\Lambda=1 \mu\text{m}$ 时,第 0、+1 级反射衍射光的衍射效率随着空气间隙变化的关系



(a) TE 偏振

(a) TE polarization



(b) TM 偏振

(b) TM polarization

图 6 反射场中 0、+1 级次的衍射效率随着空气间隙变化的关系($\Lambda=1 \mu\text{m}, \theta=22^\circ, \varphi=10^\circ$)

Fig.6 Simulated diffraction efficiencies of reflected 0th and +1st orders versus gap thickness with $\Lambda=1 \mu\text{m}, \theta=22^\circ$ and $\varphi=10^\circ$

图。随着空气间隙的增加,第 0、+1 级反射衍射光的衍射效率近似呈周期性变化,周期为 $\lambda_0/4$,偏振效应也很明显。当空气间隙从 $1 \mu\text{m}$ 变化至 $2 \mu\text{m}$ 时,与 $\Lambda=4 \mu\text{m}$ 的+1 级衍射光相比,TE、TM 偏振入射时 0、+1 级衍射光的位移灵敏度均提高一倍。可以准确监测该传感器中声压或驱动电压引起的金属膜位移的变化。

3 结 论

随着光栅特征尺寸的不断减小和浮雕深度的不断增加,必须采用严格的矢量理论来模拟光栅的衍射。文中基于严格耦合波方法,将嵌入式光栅多层结构平面衍射的理论模型扩展至锥形衍射的情况,也可以计算具有多个光栅层的多层结构的锥形衍射。首先研究了微机械声光传感器的锥形衍射中+1 级光衍射效率随着谐波数的变化关系。对于铝光栅周期为 $4 \mu\text{m}$ 且 TM 偏振入射时,当谐波数分别为 67、69、71 时,+1 级光衍射效率分别为 28.86%、28.84%、28.86%,收敛性较好。

然后采用建立的模型设计优化了微机械声光传感器的位移灵敏度。当 $\theta=22^\circ, \varphi=10^\circ$ 和 $\Lambda=1 \mu\text{m}$ 时,随着空气间隙的增加,第 0、+1 级反射衍射光的衍射效率近似呈周期性变化,周期为 $\lambda_0/4$ 。与 $\Lambda=4 \mu\text{m}$ 的+1 级衍射光相比,TE、TM 偏振入射时 0、+1 级衍射光的位移灵敏度均提高一倍,可以准确地监测该传感器中声压或驱动电压引起的金属膜位移的变化。

参考文献:

- [1] Wang Bo. Polarization -selectivity of high -density phase gratings [J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2010, 3(4): 348-352. (in Chinese)
王博. 高密度相位光栅的偏振选择性[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(4): 348-352.
- [2] Cai Tuo, Sang Tian, Zhao Hua. Coupled -wave analysis, numerical calculation and discussion for diffraction properties of grating [J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(4): 141-146. (in Chinese)
蔡托, 桑田, 赵华. 光栅衍射特性的耦合波分析、计算与讨论[J]. 光电工程, 2010, 37(4): 141-146.
- [3] Fan Shuwei, Zhou Qinghua, Li Hong. Research of optimization design of groove diffraction grating profile parameters [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30 (11): 3133-3139. (in Chinese)
樊叔维, 周庆华, 李红. 槽型衍射光栅结构参数优化设计研究[J]. 光学学报, 2010, 30(11): 3133-3139.
- [4] Wang Haibin, Wu Jianhong, Liu Quan. Diffraction characteristics of convex rectangular grating [J]. Laser Journal, 2010, 31(4): 15-17. (in Chinese)
汪海滨, 吴建宏, 刘全. 凸球面矩型槽光栅的衍射特性. 激光杂志, 2010, 31(4): 15-17.
- [5] Yang Huiyin, Zhang Dawei, Huang Yuansheng, et al. Analysis of the electromagnetic field in the subwavelength grating using methods of coupling -wave and pattern -matching respectively [J]. Laser Journal, 2011, 32(1): 29-31. (in Chinese)
杨惠尹, 张大伟, 黄元申, 等. 耦合波法和模式匹配法分析亚波长光栅中的光场分布[J]. 激光杂志, 2011, 32(1): 29-31.
- [6] Moharam M G, Gaylord T K. Rigorous coupled -wave analysis of planar -grating diffraction [J]. J Opt Soc Am, 1981, 71(7): 811-818.
- [7] Moharam M G, Grann E B, Pommet D A, et al. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled -wave analysis of binary gratings [J]. J Opt Soc Am A, 1995, 12(5): 1068-1076.
- [8] Moharam M G, Pommet D A, Grann E B, et al. Stable implementation of the rigorous coupled -wave analysis for surface -relief gratings: enhanced transmittance matrix approach[J]. J Opt Soc Am A, 1995, 12(5): 1077-1086.
- [9] Li L F, Haggans C W. Convergence of the coupled -wave method for metallic lamellar diffraction gratings [J]. J Opt Soc Am A, 1993, 10(6): 1184-1189.
- [10] Peng S, Morris G M. Efficient implementation of rigorous coupled -wave analysis for surface -relief gratings [J]. J Opt Soc Am A, 1995, 12(5): 1087-1096.
- [11] Lalanne P, Morris G M. Highly improved convergence of the coupled -wave method for TM polarization [J]. J Opt Soc Am A, 1996, 13(4): 779-784.
- [12] Li L F. Use of Fourier series in the analysis of discontinuous periodic structures [J]. J Opt Soc Am A, 1996, 13(9): 1870-1876.
- [13] Lee W, Degertekin F L. Rigorous coupled -wave analysis of multilayered grating structures [J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(10): 2359-2363.