



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102636951 A

(43) 申请公布日 2012. 08. 15

(21) 申请号 201210148199. 3

(22) 申请日 2012. 05. 11

(71) 申请人 北京理工大学

地址 100081 北京市海淀区中关村南大街 5
号

(72) 发明人 李艳秋 杨亮

(74) 专利代理机构 北京理工大学专利中心

11120

代理人 李爱英 杨志兵

(51) Int. Cl.

G03F 1/26 (2012. 01)

G03F 1/30 (2012. 01)

权利要求书 2 页 说明书 11 页 附图 9 页

(54) 发明名称

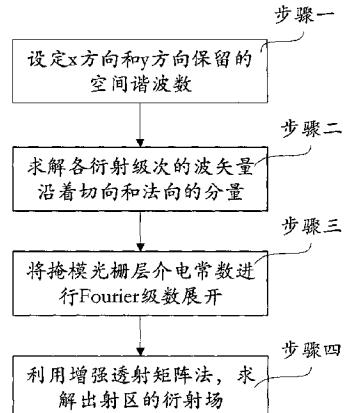
双吸收层交替相移接触孔掩模衍射场的计算
方法

(57) 摘要

本发明提供一种双吸收层交替相移接触孔掩模衍射的计算方法,该方法可以快速计算光刻中双吸收层交替相移接触孔掩模的衍射。具体步骤为:步骤一、设定x方向上保留的谐波数,设定y方向上保留的谐波数;步骤二、根据布洛开条件,求解各个衍射级次的波矢量沿着切向和法向的分量;步骤三、将每一层二维光栅的介电常数及介电常数倒数进行傅里叶 Fourier 级数展开;步骤四、利用增强透射矩阵法求解出射区域的衍射场。本发明在两个正交的方向上,通过选取三个光栅层在对应正交方向上周期的最小公倍数,进行 Fourier 级数展开,可分析两个正交方向上周期都不同的多层二维掩模光栅的衍射,同时本发明能快速求解得到双吸收层交替相移接触孔掩模的衍射场。

A

CN 102636951



1. 一种双吸收层交替相移接触孔掩模衍射场的计算方法, 其特征在于, 具体步骤为:

步骤一、设定 x 方向上保留的谐波数为 L_x , 设定 y 方向上保留的谐波数为 L_y ;

步骤二、根据布洛开 (Floquet) 条件, 求解第 (m, n) 个衍射级次的波矢量沿着切向、法向的分量, 其中 m 为取遍 $[-D_x, D_x]$ 之间的整数, n 为取遍 $[-D_y, D_y]$ 之间的整数, $L_x = 2D_x + 1$, $L_y = 2D_y + 1$;

波矢量沿着切向即 x、y 轴的分量 α_m 、 β_n 为:

$$\begin{cases} \alpha_m = \alpha_0 - 2\pi m / \Lambda_x \\ \beta_n = \beta_0 - 2\pi n / \Lambda_y \end{cases} \quad (1)$$

$$\alpha_0 = n_I k \sin \theta \cos \delta, \beta_0 = n_I k \sin \theta \sin \delta \quad (2)$$

其中 k 是入射光波在真空中的波矢量, n_I 是入射区的折射率, θ 是光波的入射角, δ 为光波的方位角, Λ_x 为掩模沿 x 方向三层光栅周期的最小公倍数, Λ_y 为掩模沿 y 方向三层光栅周期的最小公倍数;

波矢量沿着光栅平面的法向即 z 轴的分量 r_{mn} 、 t_{mn} 为:

$$r_{mn} = \begin{cases} [(n_I k)^2 - \alpha_m^2 - \beta_n^2]^{1/2} & \alpha_m^2 + \beta_n^2 \leq (n_I k)^2 \\ -j[\alpha_m^2 + \beta_n^2 - (n_I k)^2]^{1/2} & \alpha_m^2 + \beta_n^2 > (n_I k)^2 \end{cases} \quad (3)$$

$$t_{mn} = \begin{cases} [(n_{II} k)^2 - \alpha_m^2 - \beta_n^2]^{1/2} & \alpha_m^2 + \beta_n^2 \leq (n_{II} k)^2 \\ -j[\alpha_m^2 + \beta_n^2 - (n_{II} k)^2]^{1/2} & \alpha_m^2 + \beta_n^2 > (n_{II} k)^2 \end{cases} \quad (4)$$

其中下标 I 表示入射区, n_I 表示入射区的折射率, 下标 II 表示出射区, n_{II} 表示出射区的折射率, j 表示虚数单位;

步骤三、将每一层二维光栅的介电常数及介电常数倒数进行傅里叶 Fourier 级数展开;

介电常数可作傅立叶展开表示成:

$$\varepsilon_\ell(x, y) = \sum_{p=-\partial_x}^{\partial_x} \sum_{q=-\partial_y}^{\partial_y} \varepsilon_{\ell,(p,q)} \exp[j2\pi(px/\Lambda_x + qy/\Lambda_y)] \quad (\ell = 1, 2) \quad (5)$$

$$\varepsilon_{\ell'}(x, y) = \sum_{p=-\partial_x}^{\partial_x} \sum_{q=-\partial_y}^{\partial_y} \varepsilon_{\ell',(p,q)} \exp[j2\pi(px/\Lambda_x + qy/\Lambda_y)] \quad (\ell' = 3) \quad (6)$$

其中 $\varepsilon_{1,(p,q)}$ 是第 1 层光栅相对介电常数第 (p, q) 个 Fourier 分量, $\varepsilon_{1',(p,q)}$ 是第 1' 层光栅相对介电常数第 (p, q) 个 Fourier 分量, $\partial_x = L_x - 1$, $\partial_y = L_y - 1$;

介电常数倒数作傅立叶展开表示成:

$$1/\varepsilon_\ell(x, y) = \sum_{p=-\partial_x}^{\partial_x} \sum_{q=-\partial_y}^{\partial_y} \xi_{\ell,(p,q)} \exp[j2\pi(px/\Lambda_x + qy/\Lambda_y)] \quad (\ell = 1, 2) \quad (7)$$

$$1/\varepsilon_{\ell'}(x, y) = \sum_{p=-\partial_x}^{\partial_x} \sum_{q=-\partial_y}^{\partial_y} \xi_{\ell',(p,q)} \exp[j2\pi(px/\Lambda_x + qy/\Lambda_y)] \quad (\ell' = 3) \quad (8)$$

其中 $\xi_{1,(p,q)}$ 是第 1 层光栅相对介电常数倒数的第 (p, q) 个 Fourier 分量, $\xi_{1',(p,q)}$ 是第 1' 层光栅相对介电常数倒数的第 (p, q) 个 Fourier 分量;

步骤四、根据步骤二中计算的 α_m 、 β_n 、 $r_{(m, n)}$ 、 $t_{(m, n)}$ 以及步骤三中计算的 $\varepsilon_{1, (p, q)}$ 、 $\varepsilon_{1', (p, q)}$ 及 $\xi_{1, (p, q)}$ 求解每层光栅的特征矩阵，根据电磁场切向连续边界条件，利用增强透射矩阵法求解出射区域的衍射场。

双吸收层交替相移接触孔掩模衍射场的计算方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种双吸收层交替相移接触孔掩模衍射场的计算方法，属于光刻分辨率增强技术领域。

背景技术

[0002] 半导体产业的飞速发展，主要得益于微电子技术的微细加工技术的进步，而光刻技术是芯片制备中最关键的制造技术之一。由于光学光刻技术的不断创新，它一再突破人们预期的光学曝光极限，使之成为当前曝光的主流技术。

[0003] 光刻系统主要分为：照明系统（光源）、掩模、投影系统及晶片四部分。光入射到掩模上发生衍射，衍射光进入投影系统后在晶片上干涉成像，再经过显影和蚀刻处理后，就将图形转移到晶片上。

[0004] 掩模上的结构比较复杂，按照在各方向上的周期性，掩模可以分成一维、二维图形。一维图形仅在一个方向上具有周期性，比较简单，常见的线条 / 空间 (Line/Space) 结构就是一维图形。二维图形在两个方向上都具有周期性，是一些较复杂的几何图形，与实际器件结构更为接近。接触孔 (Contact Hole)、L 图形、拼接图形及 H 图形都是二维结构。另外，按照图形密度又可以分为密集图形、半密集图形和孤立图形三类。

[0005] 为了更好地理解上述过程发生的物理机理，需要建立模型，并模拟仿真光在其中的传播。且光刻仿真已经成为发展、优化光刻工艺的重要工具。这里我们重点介绍掩模衍射的计算方法。

[0006] 模拟仿真掩模衍射主要有两种方法：基尔霍夫方法 (Kirchhoff approach) 及严格的电磁场方法 (Rigorous electromagnetic field)。Kirchhoff 方法将掩模当成无限薄的，透过电场的幅值、相位直接由掩模布局 (mask layout) 决定。例如在二元掩模 (binary masks, BIM) 中，透光区域的光强为 1，相位为 0，不透光区域光强为 0。例如在交替相移掩模 (alternating phase shift masks, Alt. PSM) 中，透光区域的刻蚀区透过光强度为 1，相位为 π ，透光区域的非刻蚀区透过光强度为 1，相位为 0，不透光区域的透过光强度都为 0。Kirchhoff 方法的主要特点是掩模不同区域的强度、相位变化很陡直。

[0007] 当掩模特征尺寸远大于波长且厚度远小于波长时候，光的偏振特性不明显，此时 Kirchhoff 近似是十分精确的。随着光刻技术发展到 45nm 时，掩模的特征尺寸接近光源波长 (ArF)，且掩模厚度也达到波长量级，再加上采用大数值孔径 (Numerical Aperture, NA) 的浸没式光刻，光的偏振效应十分明显，必须采用严格的电磁场模型来模拟掩模的衍射。

[0008] 严格的电磁场模型完全考虑了掩模的 3D (Three Dimensional) 效应及材料的影响。采用的数值方法主要包括：时域有限差分法 (finite-difference time domain method, FDTD)、严格耦合波法 (rigorous coupled wave analysis, RCWA)、波导法 (the waveguide method, WG) 及有限元法 (finite element methods, FEM)。FDTD 中，将麦克斯韦 (Maxwell) 方程在空间、时间上进行离散化，这些离散化的方程对时间进行积分就得到了掩模衍射场，解的精度取决于离散化时步长的大小。RCWA 及 WG 是将掩模电磁场、

介电常数进行傅里叶 Fourier 级数展开得到特征值方程,再通过求解特征值方程得到问题的解,解的精度取决于 Fourier 展开时的阶数。FEM 比较复杂,理解起来也很困难,并不十分流行。通过这些严格的电磁场模型,要么得到掩模近场的幅值、相位,要么直接得到远场衍射光的幅值、相位。严格电磁场模型表明,掩模透过区域与不透过区域透过电场幅值、相位变化不再那么陡直。

[0009] 现有技术 (J. Opt. Soc. Am. A, 1994, 11, 9 :2494-2502 ; JOURNAL OF MUDANJIANG COLLEGE OF EDUCATION, 2009, 6 :57-59) 公开了一种利用 RCWA 分析二维亚波长光栅的衍射特性。但该方法具有以下不足,其只能分析周期相同的多层二维光栅;该方法分析的是电介质光栅衍射特性,且收敛性较差;同时该方法只分析了一层二维光栅的衍射,而在交替相移接触孔掩模中,掩模有三个光栅层,玻璃基底中刻蚀区域在两个正交的方向上 (x、y) 的周期是掩模吸收层对应周期的二倍,两个正交方向上的周期都不相同,且基底移相区呈现交叉光栅特性。因此采用上述方法不能计算双吸收层交替相移接触孔掩模的衍射。

发明内容

[0010] 本发明提供一种双吸收层交替相移接触孔掩模衍射的计算方法,该方法可以快速计算光刻中双吸收层交替相移接触孔掩模的衍射。

[0011] 实现本发明的技术方案如下:

[0012] 一种双吸收层交替相移接触孔掩模衍射的计算方法,具体步骤为:

[0013] 步骤一、设定 x 方向上保留的谐波数为 L_x , 设定 y 方向上保留的谐波数为 L_y ;

[0014] 步骤二、根据布洛开 (Floquet) 条件,求解第 (m, n) 个衍射级次的波矢量沿着切向、法向的分量,其中 m 为取遍 $[-D_x, D_x]$ 之间的整数, n 为取遍 $[-D_y, D_y]$ 之间的整数, $L_x = 2D_x + 1$, $L_y = 2D_y + 1$;

[0015] 波矢量沿着切向即 x、y 轴的分量 α_m 、 β_n 为:

$$\begin{cases} \alpha_m = \alpha_0 - 2\pi m / \Lambda_x \\ \beta_n = \beta_0 - 2\pi n / \Lambda_y \end{cases} \quad (1)$$

$$[0017] \alpha_0 = n_I k \sin \theta \cos \delta, \beta_0 = n_I k \sin \theta \sin \delta \quad (2)$$

[0018] 其中 k 是入射光波在真空中波矢量, n_I 是入射区的折射率, θ 是光波的入射角, δ 为光波的方位角, Λ_x 为掩模沿 x 方向三层光栅周期的最小公倍数, Λ_y 为掩模沿 y 方向三层光栅周期的最小公倍数;

[0019] 波矢量沿着光栅平面的法向即 z 轴的分量 r_{mn} 、 t_{mn} 为:

$$[0020] r_{mn} = \begin{cases} [(n_I k)^2 - \alpha_m^2 - \beta_n^2]^{1/2} & \alpha_m^2 + \beta_n^2 \leq (n_I k)^2 \\ -j[\alpha_m^2 + \beta_n^2 - (n_I k)^2]^{1/2} & \alpha_m^2 + \beta_n^2 > (n_I k)^2 \end{cases} \quad (3)$$

$$[0021] t_{mn} = \begin{cases} [(n_{II} k)^2 - \alpha_m^2 - \beta_n^2]^{1/2} & \alpha_m^2 + \beta_n^2 \leq (n_{II} k)^2 \\ -j[\alpha_m^2 + \beta_n^2 - (n_{II} k)^2]^{1/2} & \alpha_m^2 + \beta_n^2 > (n_{II} k)^2 \end{cases} \quad (4)$$

[0022] 其中下标 I 表示入射区, n_I 表示入射区的折射率, 下标 II 表示出射区, n_{II} 表示出射区的折射率, j 表示虚数单位;

[0023] 步骤三、将每一层二维光栅的介电常数及介电常数倒数进行傅里叶 Fourier 级数展开;

[0024] 介电常数可作傅立叶展开表示成：

$$[0025] \varepsilon_\ell(x, y) = \sum_{p=-\partial_x}^{\partial_x} \sum_{q=-\partial_y}^{\partial_y} \varepsilon_{\ell,(p,q)} \exp[j2\pi(px/\Lambda_x + qy/\Lambda_y)] \quad (\ell = 1, 2) \quad (5)$$

$$[0026] \varepsilon_{\ell'}(x, y) = \sum_{p=-\partial_x}^{\partial_x} \sum_{q=-\partial_y}^{\partial_y} \varepsilon_{\ell',(p,q)} \exp[j2\pi(px/\Lambda_x + qy/\Lambda_y)] \quad (\ell' = 3) \quad (6)$$

[0027] 其中 $\varepsilon_{1,(p,q)}$ 是第 1 层光栅相对介电常数第 (p, q) 个 Fourier 分量, $\varepsilon_{1',(p,q)}$ 是第 1' 层光栅相对介电常数第 (p, q) 个 Fourier 分量；

[0028] 介电常数倒数可作傅立叶展开表示成：

$$[0029] 1/\varepsilon_\ell(x, y) = \sum_{p=-\partial_x}^{\partial_x} \sum_{q=-\partial_y}^{\partial_y} \xi_{\ell,(p,q)} \exp[j2\pi(px/\Lambda_x + qy/\Lambda_y)] \quad (\ell = 1, 2) \quad (7)$$

$$[0030] 1/\varepsilon_{\ell'}(x, y) = \sum_{p=-\partial_x}^{\partial_x} \sum_{q=-\partial_y}^{\partial_y} \xi_{\ell',(p,q)} \exp[j2\pi(px/\Lambda_x + qy/\Lambda_y)] \quad (\ell' = 3) \quad (8)$$

[0031] 其中 $\xi_{1,(p,q)}$ 是第 1 层光栅相对介电常数倒数的第 (p, q) 个 Fourier 分量, $\xi_{1',(p,q)}$ 是第 1' 层光栅相对介电常数倒数的第 (p, q) 个 Fourier 分量；

[0032] 步骤四、根据步骤二中计算的 a_m 、 b_n 、 $r_{(m,n)}$ 、 $t_{(m,n)}$ 以及步骤三中计算的 $\varepsilon_{1,(p,q)}$ 、 $\varepsilon_{1',(p,q)}$ 、 $\xi_{1,(p,q)}$ 及 $\xi_{1',(p,q)}$ 求解每层光栅的特征矩阵, 根据电磁场切向连续边界条件, 利用增强透射矩阵法求解出射区域的衍射场。

[0033] 有益效果

[0034] 本发明中在两个正交的方向 (x, y) 上, 通过选取三个光栅层在对应方向上周期的最小公倍数, 进行 Fourier 级数展开, 可分析两个正交方向 (x, y) 上周期都不同的多层二维掩模光栅的衍射, 且可以分析基底区交叉光栅的衍射; 本发明通过采用增强透射矩阵法分析三层光栅锥形入射的情况, 能快速求解得到双吸收层交替相移接触孔掩模的衍射场。

附图说明

[0035] 图 1 为双吸收层交替相移接触孔掩模示意图。

[0036] 图 2 为求解双吸收层交替相移接触孔掩模衍射流程图。

[0037] 图 3 为本发明矩阵 E_1 的示意图。

[0038] 图 4 为本发明矩阵 E_1' 的示意图。

[0039] 图 5 为本发明矩阵 A_1 的示意图。

[0040] 图 6 为本发明矩阵 A_1' 的示意图。

[0041] 图 7 为本发明矩阵 K_x 的示意图。

[0042] 图 8 为本发明矩阵 K_y 的示意图。

[0043] 图 9 为本发明单位矩阵 I 的示意图。

[0044] 图 10 为本发明矩阵 Y_I 的示意图。

[0045] 图 11 为本发明矩阵 Z_I 的示意图。

[0046] 图 12 为本发明矩阵 Y_{II} 的示意图。

[0047] 图 13 为本发明矩阵 Z_{II} 的示意图。

[0048] 图 14 为本发明矩阵 F_c 的示意图。

[0049] 图 15 为本发明矩阵 F_s 的示意图。

[0050] 图 16 为 TE 偏振光锥形入射 ($\theta = 10^\circ$, $\varphi = 30^\circ$ 、 $\lambda = 193\text{nm}$) 双吸收层 (Cr0/Cr) 交替相移接触孔掩模时, $(0, 0)$ 、 $(0, 2)$ 、 $(1, 1)$ 、 $(2, 0)$ 衍射级次的衍射效率随着特征尺寸 (晶圆尺度, nm) 的变化关系图。

具体实施方式

[0051] 下面结合附图对本发明进行进一步详细说明。

[0052] 双吸收层交替相移接触孔掩模示意图如图 1 所示, 以下对本实施例中涉及的掩模进行说明。

[0053] 本发明以掩模平面 (光栅平面) 的法线方向为 z 轴, 依照右手坐标系原则, 确定 x 轴和 y 轴, 建立坐标系 (x, y, z) 如图 1 所示。

[0054] 双吸收层交替相移接触孔掩模沿 z 轴方向分为三层, 两层吸收层和一层相移层; 第一吸收层 ($z_0 < z < z_1$) 一般为 Cr0, 厚度为 $d_1 = z_1 - z_0$, 第二吸收层 ($z_1 < z < z_2$) 一般为 Cr, 厚度为 $d_2 = z_2 - z_1$, 第三相移层, 其刻蚀深度为 $d = \lambda / 2(n-1)$, 以实现 180° 的相移。第一吸收层沿 x 轴呈周期 Λ_{1x} 分布, 占空比为 f_{1x} , 第一吸收层沿 y 轴呈周期 Λ_{1y} 分布, 占空比为 f_{1y} 。第二层吸收层沿 x 轴呈周期 Λ_{2x} 分布, 占空比为 f_{2x} , 第二吸收层沿 y 轴呈周期 Λ_{2y} 分布, 占空比为 f_{2y} 。且前两层分别在 x、y 轴上的周期和占空比均相同, 即 $\Lambda_{1x} = \Lambda_{2x}$ 、 $f_{1x} = f_{2x}$ 、 $\Lambda_{1y} = \Lambda_{2y}$ 、 $f_{1y} = f_{2y}$, 但 $f_{1x} \neq f_{1y}$, $f_{2x} \neq f_{2y}$ 。第三层为电介质, 沿 x 轴呈周期 Λ_{3x} 分布, 占空比为 f_{3x} , 沿 y 轴呈周期 Λ_{3y} 分布, 占空比为 f_{3y} , 且 $\Lambda_{3y} = 2\Lambda_{1y}$, $\Lambda_{3x} = 2\Lambda_{1x}$ 。顶层 ($L' = 0$)、底层 ($L' = 4$) 是分别是入射区、出射区, 且沿着 z 轴的负向、正向是无限扩展, 且顶层的折射率为 n_I , 底层的折射率为 n_{II} 。

[0055] 一束线偏振光入射到二维光栅上发生衍射, 入射角为 θ , 方位角 (入射平面与 x 轴夹角) 为 δ , 偏振角 (入射电场矢量与入射平面的夹角) 为 ψ , $\psi = 90^\circ$ 当对应于 TE 偏振光, $\psi = 0^\circ$ 对应于 TM 偏振光。

[0056] 如图 2 所示, 本发明双吸收层交替相移接触孔掩模衍射场计算方法的流程图; 具体步骤为:

[0057] 步骤一、设定 x 方向上保留的谐波数为 L_x , 设定 y 方向上保留的谐波数为 L_y ; 上述两谐波数可以根据需要进行设定, 若希望在求解电场能有较快的速度, 则可以将其设置较小, 若希望所求解的电场有较高的精度, 则可以将其设置较大, 同时也可以令 $L_x = L_y$ 。

[0058] 步骤二、根据布洛开 (Floquet) 条件, 求解第 (m, n) 个衍射级次的波矢量沿着切向、法向的分量, 其中 m 为取遍 $[-D_x, D_x]$ 之间的整数, n 为取遍 $[-D_y, D_y]$ 之间的整数, $L_x = 2D_x + 1$, $L_y = 2D_y + 1$ 。

[0059] 波矢量沿着切向即 x、y 轴的分量 α_m 、 β_n 为:

$$\begin{cases} \alpha_m = \alpha_0 - 2\pi m / \Lambda_x \\ \beta_n = \beta_0 - 2\pi n / \Lambda_y \end{cases} \quad (1)$$

$$[0061] \alpha_0 = n_I k \sin \theta \cos \delta, \beta_0 = n_I k \sin \theta \sin \delta \quad (2)$$

[0062] 其中 k 是入射光波在真空中的波矢量, n_I 是入射区的折射率, θ 是光波的入射角, δ 为光波的方位角, Λ_x 为掩模沿 x 方向三层光栅周期的最小公倍数, 由于 $\Lambda_{3y} = 2\Lambda_{1y}$, 所

以此处的 $\Lambda_y = \Lambda_{3y}$, Λ_y 为掩模沿 y 方向三层光栅周期的最小公倍数, 由于 $\Lambda_{3x} = 2\Lambda_{1x}$, 所以此处的 $\Lambda_x = \Lambda_{3x}$ 。

[0063] 波矢量沿着光栅平面的法向即 z 轴的分量 r_{mn} 、 t_{mn} 为 :

$$[0064] r_{mn} = \begin{cases} [(n_I k)^2 - \alpha_m^2 - \beta_n^2]^{1/2} & \alpha_m^2 + \beta_n^2 \leq (n_I k)^2 \\ -j[\alpha_m^2 + \beta_n^2 - (n_I k)^2]^{1/2} & \alpha_m^2 + \beta_n^2 > (n_I k)^2 \end{cases} \quad (3)$$

$$[0065] t_{mn} = \begin{cases} [(n_{II} k)^2 - \alpha_m^2 - \beta_n^2]^{1/2} & \alpha_m^2 + \beta_n^2 \leq (n_{II} k)^2 \\ -j[\alpha_m^2 + \beta_n^2 - (n_{II} k)^2]^{1/2} & \alpha_m^2 + \beta_n^2 > (n_{II} k)^2 \end{cases} \quad (4)$$

[0066] 其中下标 I 表示入射区, n_I 表示入射区的折射率, 下标 II 表示出射区, n_{II} 表示出射区的折射率, j 表示虚数单位。

[0067] 步骤三、将每一层二维光栅的介电常数及介电常数倒数进行傅里叶 Fourier 级数展开。由于三层二维光栅在 x、y 方向上的周期不同, 级数展开时应选取三层光栅在对应方向上周期的最小公倍数。在做 Fourier 级数展开时, 所选择的单位区域如图 1(a) 中虚线所示。

[0068] 介电常数可作傅立叶展开表示成 :

$$[0069] \varepsilon_\ell(x, y) = \sum_{p=-\partial_x}^{\partial_x} \sum_{q=-\partial_y}^{\partial_y} \varepsilon_{\ell, (p, q)} \exp[j2\pi(px/\Lambda_x + qy/\Lambda_y)] \quad (\ell = 1, 2) \quad (5)$$

$$[0070] \varepsilon_{\ell'}(x, y) = \sum_{p=-\partial_x}^{\partial_x} \sum_{q=-\partial_y}^{\partial_y} \varepsilon_{\ell', (p, q)} \exp[j2\pi(px/\Lambda_x + qy/\Lambda_y)] \quad (\ell' = 3) \quad (6)$$

[0071] 其中 $\varepsilon_{1, (p, q)}$ 是第 1 层光栅相对介电常数第 (p, q) 个 Fourier 分量, $\varepsilon_{1', (p, q)}$ 是第 1' 层光栅相对介电常数第 (p, q) 个 Fourier 分量。

[0072] 介电常数倒数可作傅立叶展开表示成 :

$$[0073] 1/\varepsilon_\ell(x, y) = \sum_{p=-\partial_x}^{\partial_x} \sum_{q=-\partial_y}^{\partial_y} \xi_{\ell, (p, q)} \exp[j2\pi(px/\Lambda_x + qy/\Lambda_y)] \quad (\ell = 1, 2) \quad (7)$$

$$[0074] 1/\varepsilon_{\ell'}(x, y) = \sum_{p=-\partial_x}^{\partial_x} \sum_{q=-\partial_y}^{\partial_y} \xi_{\ell', (p, q)} \exp[j2\pi(px/\Lambda_x + qy/\Lambda_y)] \quad (\ell' = 3) \quad (8)$$

[0075] 其中 $\xi_{1, (p, q)}$ 是第 1 层光栅相对介电常数倒数的第 (p, q) 个 Fourier 分量。其中 $\xi_{1', (p, q)}$ 是第 1' 层光栅相对介电常数倒数的第 (p, q) 个 Fourier 分量。

[0076] 步骤四、根据步骤二中计算的 α_m 、 β_n 、 $r_{(m, n)}$ 、 $t_{(m, n)}$ 以及步骤三中计算的 $\varepsilon_{1, (p, q)}$ 、 $\varepsilon_{1', (p, q)}$ 及 $\xi_{1, (p, q)}$ 及 $\xi_{1', (p, q)}$ 求解每层光栅的特征矩阵, 根据电磁场切向连续边界条件, 利用增强透射矩阵法求解出射区域的衍射场。

[0077] 步骤 401、求解每个二维光栅层的特征矩阵 ;

[0078] 二维光栅的特征矩阵为 :

$$[0079] M_1 = F_1 G_1 \quad (l = 1, 2) \quad (9)$$

$$[0080] M_1' = F_1' G_1' \quad (l' = 3) \quad (10)$$

[0081] 其中

$$[0082] \quad \mathbf{F}_\ell = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_y \mathbf{A}_\ell \mathbf{K}_x & \mathbf{I} - \mathbf{K}_y \mathbf{A}_\ell \mathbf{K}_y \\ \mathbf{K}_x \mathbf{A}_\ell \mathbf{K}_x - \mathbf{I} & -\mathbf{K}_x \mathbf{A}_\ell \mathbf{K}_y \end{bmatrix} \quad (\ell = 1, 2) \quad (11)$$

$$[0083] \quad \mathbf{G}_\ell = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_x \mathbf{K}_y & \alpha \mathbf{A}_\ell^{-1} + (1-\alpha) \mathbf{E}_\ell - \mathbf{K}_y^2 \\ \mathbf{K}_x^2 - \alpha \mathbf{E}_\ell - (1-\alpha) \mathbf{A}_\ell^{-1} & -\mathbf{K}_x \mathbf{K}_y \end{bmatrix} \quad (\ell = 1, 2) \quad (12)$$

$$[0084] \quad \alpha = \frac{f_{1y} \Lambda_{1y}}{f_{1x} \Lambda_{1x} + f_{1y} \Lambda_{1y}} \quad (13)$$

$$[0085] \quad \mathbf{F}_{\ell'} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_y \mathbf{E}_{\ell'}^{-1} \mathbf{K}_x & \mathbf{I} - \mathbf{K}_y \mathbf{E}_{\ell'}^{-1} \mathbf{K}_y \\ \mathbf{K}_x \mathbf{E}_{\ell'}^{-1} \mathbf{K}_x - \mathbf{I} & -\mathbf{K}_x \mathbf{E}_{\ell'}^{-1} \mathbf{K}_y \end{bmatrix} \quad (\ell' = 3) \quad (14)$$

$$[0086] \quad \mathbf{G}_{\ell'} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_x \mathbf{K}_y & \mathbf{A}_{\ell'}^{-1} - \mathbf{K}_y^2 \\ \mathbf{K}_x^2 - \mathbf{A}_{\ell'}^{-1} & -\mathbf{K}_x \mathbf{K}_y \end{bmatrix} \quad (\ell' = 3) \quad (15)$$

[0087] 其中 E_1, E_1' , A_1, A_1' , K_x, K_y, I 都是 $(L_t \times L_t)$ 阶矩阵, $L_t = L_x \times L_y$, 1 和 $1'$ 皆表示层数。 E_1 中的元素为 $\varepsilon_{1, (p, q)}$, E_1' 中的元素为 $\varepsilon_{1', (p, q)}$, A_1 中的元素为 $\xi_{1, (p, q)}$, A_1' 中的元素为 $\xi_{1', (p, q)}$ 。

[0088] 例如本发明设定 $L_x = 3, L_y = 3$, 由于 $\partial_x = L_x - 1, \partial_y = L_y - 1$ 则 $\partial_x = 2, \partial_y = 2$, $p = [-2, -1, 0, 1, 2], q = [-2, -1, 0, 1, 2]$; 对于第 1 层光栅来说, 根据步骤三生成的 $\varepsilon_{1, (p, q)}$ 为 $(2\partial_x + 1) \times (2\partial_y + 1) = 25$ 个, 分别为: $\varepsilon_{1, (-2, -2)}, \varepsilon_{1, (-2, -1)}, \dots, \varepsilon_{1, (2, 2)}$ 。

[0089] 每一层光栅对应的 E_1 的分配规则相同, 以下忽略对层数的考虑, 对大小为 $(L_t \times L_t)$ 即 9×9 的矩阵 E_1 上元素的分配规律进行说明:

[0090] 将 E_1 分成 $L_y \times L_y$ (即 9) 个 $L_x \times L_x$ (即 3×3) 的小矩阵, 并将每一小矩阵 $e_{(i, j)}$ 当作一元素, 其中 $i = [1, 2, 3], j = [1, 2, 3]$, $e_{(1, 1)}$ 为坐标等于 $(1, 1)$ 的小矩阵, $e_{(1, 2)}$ 为坐标等于 $(1, 2)$ 的小矩阵, 并依次类推。针对于每一小矩阵 $e_{(i, j)}$ 其内包含 9 个元素 $e'_{(i, j), (i', j')}$, 其中 $i' = [1, 2, 3], j' = [1, 2, 3]$, $e'_{(i, j), (1, 1)}$ 为小矩阵 $e_{(i, j)}$ 内坐标等于 $(1, 1)$ 的小矩阵元素, $e'_{(i, j), (1, 2)}$ 为小矩阵 $e_{(i, j)}$ 内坐标等于 $(1, 2)$ 的小矩阵, 并依次类推。

[0091] 分配规律为: 在小矩阵 $e_{(i, j)}$ 中, 其第 (i', j') 个元素 $e'_{(i, j), (i', j')} = \varepsilon_{1, (i' - j', i - j)}$;

[0092] 例如对小矩阵 $e_{(1, 1)}$ 中的第 $(1, 1)$ 个元素 $e'_{(1, 1), (1, 1)}$, 由于 $i - j = 0, i' - j' = 0$, 所以 $e'_{(1, 1), (1, 1)}$ (也就是相当于 E_1 中的第 $(1, 1)$ 个元素) 等于 $\varepsilon_{1, (0, 0)}$ 。

[0093] 例如对小矩阵 $e_{(1, 1)}$ 中的第 $(1, 2)$ 个元素 $e'_{(1, 1), (1, 2)}$, 由于 $i - j = 0, i' - j' = -1$, 所以 $e'_{(1, 1), (1, 2)}$ (也就是相当于 E_1 中的第 $(1, 2)$ 个元素) 等于 $\varepsilon_{1, (-1, 0)}$ 。

[0094] 例如对小矩阵 $e_{(2, 1)}$ 中的第 $(1, 2)$ 个元素 $e'_{(2, 1), (1, 2)}$, 由于 $i - j = 1, i' - j' = -1$, 所以 $e'_{(2, 1), (1, 2)}$ (也就是相当于 E_1 中的第 $(4, 2)$ 个元素) 等于 $\varepsilon_{1, (-1, 1)}$ 。

[0095] 例如对小矩阵 $e_{(2, 1)}$ 中的第 $(3, 3)$ 个元素 $e'_{(2, 1), (3, 3)}$, 由于 $i - j = 1, i' - j' = 0$, 所以 $e'_{(2, 1), (3, 3)}$ (也就是相当于 E_1 中的第 $(6, 3)$ 个元素) 等于 $\varepsilon_{1, (0, 1)}$ 。

[0096] 例如对小矩阵 $e_{(3, 3)}$ 中的第 $(1, 3)$ 个元素 $e'_{(3, 3), (1, 3)}$, 由于 $i - j = 0, i' - j' = -2$, 所以 $e'_{(3, 3), (1, 3)}$ (也就是相当于 E_1 中的第 $(7, 9)$ 个元素) 等于 $\varepsilon_{1, (-2, 0)}$ 。

[0097] 例如对小矩阵 $e_{(3, 3)}$ 中的第 $(3, 3)$ 个元素 $e'_{(3, 3), (3, 3)}$, 由于 $i - j = 0, i' - j' = 0$, 所以 $e'_{(3, 3), (3, 3)}$ 也就是相当于 E_1 中的第 $(9, 9)$ 个元素等于 $\varepsilon_{1, (0, 0)}$ 。

- [0098] 依照上述规律获取的 E_1 如图 3 所示。
- [0099] E_1' 、 A_1 及 A_1' 上元素的分配规律与 E_1 相同,如图 4-6 所示。
- [0100] K_x 为对角矩阵,其对角元为 α_m 。
- [0101] 例如本发明设定 $L_x = 3, L_y = 3$,由于 $D_x = (L_x-1)/2$,则 $D_x = 1, m = [-1, 0, 1]$;根据步骤二生成的 α_m 为 3 个,分别为 : $\alpha_{-1}, \alpha_0, \alpha_1$ 。
- [0102] 以下对大小为 $(L_t \times L_t)$ 即 9×9 的对角矩阵 K_x 对角元素的分配规律进行说明 :
- [0103] 将 K_x 分成 $L_y \times L_y$ (即 9) 个 $L_x \times L_x$ (即 3×3) 的小矩阵,并将每一小矩阵 $k_{(i,j)}^x$ 当作一元素,其中 $i = [1, 2, 3], j = [1, 2, 3]$, $k_{(1,1)}^x$ 为坐标等于 $(1, 1)$ 的小矩阵, $k_{(1,2)}^x$ 为坐标等于 $(1, 2)$ 的小矩阵,并依次类推。针对于每一小矩阵 $k_{(i,j)}^x$ 其内包含 9 个元素 $\hat{k}_{(i,j),(i',j')}^x$,其中 $i' = [1, 2, 3], j' = [1, 2, 3]$, $\hat{k}_{(i,j),(1,1)}^x$ 为小矩阵 $k_{(i,j)}^x$ 内坐标等于 $(1, 1)$ 的小矩阵元素, $\hat{k}_{(i,j),(1,2)}^x$ 为小矩阵 $k_{(i,j)}^x$ 内坐标等于 $(1, 2)$ 的小矩阵,并依次类推。
- [0104] 由于 K_x 为对角矩阵,则只在 $k_{(1,1)}^x, k_{(2,2)}^x$ 以及 $k_{(3,3)}^x$ 的对角位置上存在元素值,其余小矩阵的元素值皆为 0。
- [0105] 分配规律为 : 在小矩阵 $k_{(i,j)}^x$ 中 (即 $j = i$), 其第 (i', j') (即 $j' = i'$) 个元素 $\hat{k}_{(i,j),(i',j')}^x = a_{i'-(D_x+1)}$; 由于该分配规律与 (i, j) 无关,所以 $k_{(1,1)}^x, k_{(2,2)}^x$ 以及 $k_{(3,3)}^x$ 完全相同。
- [0106] 例如对小矩阵 $k_{(1,1)}^x$ 中的第 $(1, 1)$ 个元素 $\hat{k}_{(1,1),(1,1)}^x$, 由于 $i' = 1, D_x = 1, i' - (D_x+1) = -1$, 所以 $\hat{k}_{(1,1),(1,1)}^x$ (也就是相当于 K_x 中的第 $(1, 1)$ 个元素) 等于 a_{-1} 。
- [0107] 例如对小矩阵 $k_{(1,1)}^x$ 中的第 $(2, 2)$ 个元素 $\hat{k}_{(1,1),(2,2)}^x$, 由于 $i' = 2, D_x = 1, i' - (D_x+1) = 0$, 所以 $\hat{k}_{(1,1),(2,2)}^x$ (也就是相当于 K_x 中的第 $(2, 2)$ 个元素) 等于 a_0 。
- [0108] 依照上述规律获取的 K_x 如图 7 所示。
- [0109] K_y 为对角矩阵,其对角元为 β_n 。
- [0110] 例如本发明设定 $L_x = 3, L_y = 3$,由于 $D_y = (L_y-1)/2$,则 $D_y = 1, n = [-1, 0, 1]$; , 根据步骤二生成的 β_n 为 3 个,分别为 : $\beta_{-1}, \beta_0, \beta_1$ 。
- [0111] 以下对大小为 $(L_t \times L_t)$ 即 9×9 的对角矩阵 K_y 对角元素的分配规律进行说明 :
- [0112] 将 K_y 分成 $L_y \times L_y$ (即 9) 个 $L_x \times L_x$ (即 3×3) 的小矩阵,并将每一小矩阵 $k_{(i,j)}^y$ 当作一元素,其中 $i = [1, 2, 3], j = [1, 2, 3]$, $k_{(1,1)}^y$ 为坐标等于 $(1, 1)$ 的小矩阵, $k_{(1,2)}^y$ 为坐标等于 $(1, 2)$ 的小矩阵,并依次类推。针对于每一小矩阵 $k_{(i,j)}^y$ 其内包含 9 个元素 $\hat{k}_{(i,j),(i',j')}^y$,其中 $i' = [1, 2, 3], j' = [1, 2, 3]$, $\hat{k}_{(i,j),(1,1)}^y$ 为小矩阵 $k_{(i,j)}^y$ 内坐标等于 $(1, 1)$ 的小矩阵元素, $\hat{k}_{(i,j),(1,2)}^y$ 为小矩阵 $k_{(i,j)}^y$ 内坐标等于 $(1, 2)$ 的小矩阵,并依次类推。

[0113] 分配规律为：在小矩阵 $k_{(i,j)}^y$ 中（即 $j = i$ ），其对角元素 $\hat{k}_{(i,j),(i',j')}^y = \beta_{i-(D_y+1)}$ ；由于该分配规律与 (i', j') 无关，所以每一小矩阵内 $k_{(i,j)}^y$ 的对角元素相同。

[0114] 例如对小矩阵 $k_{(1,1)}^y$ 中的第 $(1,1)$ 个元素 $\hat{k}_{(1,1),(1,1)}^y$ ，由于 $i = 1, D_y = 1, i-(D_y+1) = -1$ ，所以 $\hat{k}_{(1,1),(1,1)}^y$ （也就是相当于 K_y 中的第 $(1,1)$ 个元素）等于 β_{-1} 。

[0115] 例如对小矩阵 $k_{(2,2)}^y$ 中的第 $(2,2)$ 个元素 $\hat{k}_{(2,2),(2,2)}^y$ ，由于 $i = 2, D_y = 1, i-(D_y+1) = 0$ ，所以 $\hat{k}_{(2,2),(2,2)}^y$ （也就是相当于 K_y 中的第 $(5,5)$ 个元素）等于 β_0 。

[0116] 依照上述规律获取的 K_y 如图 8 所示。

[0117] I 是单位阵，如图 9 所示。

[0118] 步骤 402、求解入射区的矩阵 Y_I, Z_I ，及透射区矩阵 Y_{II}, Z_{II} 。

[0119] 其中 Y_I, Z_I 为对角矩阵，对角元素分别为 $r_{(m,n)} / k, r_{(m,n)} / kn_I^2$ ； Y_{II}, Z_{II} 也是对角矩阵，对角元素分别为 $t_{(m,n)} / k, t_{(m,n)} / kn_I^2$ 。

[0120] 矩阵 Y_I, Z_I, Y_{II} 及 Z_{II} 上元素的分配规律相同，以下选取 Y_I 作为分析对象，由于 k 为常数，因此忽略 k 对其上元素的分配规律进行详细说明。

[0121] 例如本发明设定 $L_x = 3, L_y = 3$ ，由于 $D_x = (L_x-1)/2$ ，则 $D_x = 1, m = [-1, 0, 1]$ ，由于 $D_y = (L_y-1)/2$ ，则 $D_y = 1, n = [-1, 0, 1]$ ，根据步骤二生成的 $r_{(m,n)}$ 为 $3 \times 3 = 9$ 个，分别为： $r_{(-1,-1)}, r_{(-1,0)}, r_{(-1,1)}, \dots, r_{(1,-1)}, r_{(1,0)}, r_{(1,1)}$ 。

[0122] Y_I 为 $(L_t \times L_t)$ 即 9×9 的对角矩阵，以下对 Y_I 对角元素的分配规律进行说明：

[0123] 将 Y_I 分成 $L_y \times L_y$ （即 9）个 $L_x \times L_x$ （即 3×3 ）的小矩阵，并将每一小矩阵 $y_{(i,j)}$ 当作一元素，其中 $i = [1, 2, 3], j = [1, 2, 3]$ ， $y_{(1,1)}$ 为坐标等于 $(1,1)$ 的小矩阵， $y_{(1,2)}$ 为坐标等于 $(1,2)$ 的小矩阵，并依次类推。针对于每一小矩阵 $y_{(i,j)}$ 其内包含 9 个元素 $y'_{(i,j), (i',j')}$ ，其中 $i' = [1, 2, 3], j' = [1, 2, 3]$ ， $y'_{(i,j), (i',j')}$ 为小矩阵 $y_{(i,j)}$ 内坐标等于 $(1,1)$ 的小矩阵元素， $y'_{(i,j), (1,2)}$ 为小矩阵 $y_{(i,j)}$ 内坐标等于 $(1,2)$ 的小矩阵，并依次类推。

[0124] 由于 Y_I 为对角矩阵，则只在 $y_{(1,1)}, y_{(2,2)}$ 以及 $y_{(3,3)}$ 的对角位置上存在元素值，其余小矩阵的元素值皆为 0。

[0125] 分配规律为：在小矩阵 $y_{(i,j)}$ 中（即 $j = i$ ），其第 (i', j') （即 $j' = i'$ ）个元素 $y'_{(i,j), (i',j')} = r((i' - D_x - 1), (i - D_y - 1))$ 。

[0126] 例如对小矩阵 $y_{(1,1)}$ 中的第 $(1,1)$ 个元素 $y'_{(1,1), (1,1)}$ ，由于 $i' = 1, D_x = 1, i = 1, D_y = 1, i' - (D_x + 1) = -1, i - (D_y + 1) = -1$ ，所以 $y'_{(1,1), (1,1)}$ （也就是相当于 Y_I 中的第 $(1,1)$ 个元素）等于 $r_{(-1,-1)}$ 。

[0127] 例如对小矩阵 $y_{(1,1)}$ 中的第 $(2,2)$ 个元素 $y'_{(1,1), (2,2)}$ ，由于 $i' = 2, D_x = 1, i = 1, D_y = 1, i' - (D_x + 1) = 0, i - (D_y + 1) = -1$ ，所以 $y'_{(1,1), (2,2)}$ （也就是相当于 Y_I 中的第 $(2,2)$ 个元素）等于 $r_{(0,-1)}$ 。

[0128] 例如对小矩阵 $y_{(2,2)}$ 中的第 $(2,2)$ 个元素 $y'_{(2,2), (2,2)}$ ，由于 $i' = 2, D_x = 1, i = 2, D_y = 1, i' - (D_x + 1) = 0, i - (D_y + 1) = 0$ ，所以 $y'_{(2,2), (2,2)}$ （也就是相当于 Y_I 中的第 $(5,5)$ 个元素）等于 $r_{(0,0)}$ 。

[0129] 依照上述规律获取的 Y_I 、 Z_I 、 Y_{II} 及 Z_{II} 如图 10-13 所示。

[0130] 步骤 403、利用电磁场切向连续的边界条件, 得到入射区与出射区电磁场之间的表达式;

$$[0131] \begin{bmatrix} \sin\psi\delta_{m0}\delta_{n0} \\ j\sin\psi n_i \cos\theta\delta_{m0}\delta_{n0} \\ -jn_i \cos\psi\delta_{m0}\delta_{n0} \\ \cos\psi \cos\theta\delta_{m0}\delta_{n0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ -j\mathbf{Y}_I & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ \mathbf{0} & -j\mathbf{Z}_I \end{bmatrix} \mathbf{R} =$$

$$[0132] \prod_{L=1}^{N=3} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{L,1} & \mathbf{V}_{L,1}\mathbf{X}_L \\ \mathbf{W}_{L,1} & -\mathbf{W}_{L,1}\mathbf{X}_L \\ \mathbf{W}_{L,2} & -\mathbf{W}_{L,2}\mathbf{X}_L \\ \mathbf{V}_{L,2} & \mathbf{V}_{L,2}\mathbf{X}_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{L,1}\mathbf{X}_L & \mathbf{V}_{L,1} \\ \mathbf{W}_{L,1}\mathbf{X}_L & -\mathbf{W}_{L,1} \\ \mathbf{W}_{L,2}\mathbf{X}_L & -\mathbf{W}_{L,2} \\ \mathbf{V}_{L,2}\mathbf{X}_L & \mathbf{V}_{L,2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ j\mathbf{Y}_{II} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ \mathbf{0} & j\mathbf{Z}_{II} \end{bmatrix} \mathbf{T} \quad (L = 1, 2, 3) \quad (16)$$

[0133] 其中

$$[0134] V_{L,1} = F_c W_{L,y} - F_s W_{L,x} \quad V_{L,2} = F_c W_{L,x} + F_s W_{L,y}$$

$$[0135] W_{L,1} = F_c V_{L,x} + F_s V_{L,y} \quad W_{L,2} = F_c V_{L,y} - F_s V_{L,x}$$

[0136] (17)

$$[0137] W_{L,x} = [w_{L,x}] \quad W_{L,y} = [w_{L,y}]$$

$$[0138] V_{L,x} = [v_{L,x}] \quad V_{L,y} = [v_{L,y}]$$

[0139] L 表示第 L 层二维光栅;

[0140] $\mathbf{W}_L = \begin{bmatrix} w_{L,y} \\ w_{L,x} \end{bmatrix}$ 为第 L 层二维光栅特征矩阵 M_L 的本征矢量矩阵;

[0141] $q_{L,1}$ 为第 L 层二维光栅特征矩阵 M_L 的本征值矩阵中第 (1, 1) 个元素的正平方根 $1 = [1, 2, 3, \dots, 2L_t]$;

[0142] X_L 表示第 L 层二维光栅中的对角矩阵, 对角元素 (1, 1) 为 $\exp(-kq_{L,1}d_L)$;

[0143] d_L 表示第 L 层二维光栅的厚度;

$$[0144] \mathbf{V}_L = \begin{bmatrix} v_{L,y} \\ v_{L,x} \end{bmatrix} = \mathbf{F}_L^{-1} \mathbf{Q}_L \mathbf{W}_L;$$

[0145] Q_L 是对角元素 (1, 1) 为 $q_{L,1}$ 的对角矩阵;

[0146] F_c 是对角元为 $\sin\varphi_{(m,n)}$ 的对角矩阵;

[0147] F_s 是对角元为 $\cos\varphi_{(m,n)}$ 的对角矩阵;

[0148]

$$\varphi_{(m,n)} = \tan^{-1} \left(\frac{\beta_n}{\alpha_m} \right);$$

[0149] F_c 和 F_s 的对角元素的分配规则与 Y_I 相同, 如图 14-15 所示。

[0150] δ_{m0} 为 $L_x \times 1$ 的矩阵, 其中当 $m = 0$ 时, $\delta_{(m+D_x+1, 1)} = 1$; 当 $m \neq 0$ 时, $\delta_{(m+D_x+1, 1)} = 0$;

[0151] δ'_{n0} 为 $L_y \times 1$ 的矩阵, 其中当 $n = 0$ 时, $\delta'_{(n+D_y+1, 1)} = 1$; 当 $n \neq 0$ 时, $\delta'_{(n+D_y+1, 1)} = 0$;

[0152] R 为中间变量；

[0153] T 为待求解的透射场各个衍射级次的幅值；

[0154] 步骤 404、利用增强透射矩阵法，求解透射场的各个衍射级次的幅值 T；其中 T 为 $2L_t \times 1$ 的矩阵，T 中的每一元素为复数 $a+bj$ 的形式，其中衍射场的幅值为 $\sqrt{a^2 + b^2}$ ，即获得偏振光出射区的衍射场。

[0155] 利用增强透射矩阵法，入射区与出射区电磁场之间的表达式为：

$$[0156] \begin{bmatrix} \sin\psi\delta_{m0}\delta_{n0} \\ j\sin\psi n_1 \cos\theta\delta_{m0}\delta_{n0} \\ -jn_1 \cos\psi\delta_{m0}\delta_{n0} \\ \cos\psi \cos\theta\delta_{m0}\delta_{n0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ -j\mathbf{Y}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ \mathbf{0} & -j\mathbf{Z}_1 \end{bmatrix} \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_1 \\ \mathbf{g}_1 \end{bmatrix} \mathbf{T}_1 \quad (18)$$

[0157] 其中

$$[0158] \begin{bmatrix} \mathbf{f}_L \\ \mathbf{g}_L \end{bmatrix} \mathbf{T}_L = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{L,1} & \mathbf{V}_{L,1}\mathbf{X}_L \\ \mathbf{W}_{L,1} & -\mathbf{W}_{L,1}\mathbf{X}_L \\ \mathbf{W}_{L,2} & -\mathbf{W}_{L,2}\mathbf{X}_L \\ \mathbf{V}_{L,2} & \mathbf{V}_{L,2}\mathbf{X}_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{b}_L \mathbf{a}_L^{-1} \mathbf{X}_L \end{bmatrix} \mathbf{T}_L \quad (19)$$

$$[0159] \begin{bmatrix} \mathbf{a}_L \\ \mathbf{b}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{L,1} & \mathbf{V}_{L,1} \\ \mathbf{W}_{L,1} & -\mathbf{W}_{L,1} \\ \mathbf{W}_{L,2} & -\mathbf{W}_{L,2} \\ \mathbf{V}_{L,2} & \mathbf{V}_{L,2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{L+1} \\ \mathbf{g}_{L+1} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$[0160] \begin{bmatrix} \mathbf{f}_4 \\ \mathbf{g}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ j\mathbf{Y}_{II} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ \mathbf{0} & j\mathbf{Z}_{II} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$[0161] \mathbf{T} = \mathbf{a}_3^{-1} \mathbf{X}_3 \mathbf{a}_2^{-1} \mathbf{X}_2 \mathbf{a}_1^{-1} \mathbf{X}_1 \mathbf{T}_1 \quad (22)$$

[0162] 进一步地，本发明还可求解出各衍射级次的衍射效率；

[0163] 第 (m, n) 级次的衍射效率为：

$$[0164] \eta_{(m,n)} = |T_{s,(m,n)}|^2 \operatorname{Re}\left(\frac{t_{(m,n)}}{kn_1 \cos\theta}\right) + |T_{p,(m,n)}|^2 \operatorname{Re}\left(\frac{t_{(m,n)} / n_{II}^2}{kn_1 \cos\theta}\right) \quad (23)$$

[0165] 其中 T_s 为 T 中的上半部分元素组成的矩阵， T_p 为 T 中的下半部分元素组成的矩阵。 $T_{s, (m, n)}$ 为 T_s 中的第 $((m+D_x+1)+(n+D_y)L_x)$ 个元素， $T_{p, (m, n)}$ 为 T_p 中的第 $((m+D_x+1)+(n+D_y)L_x)$ 个元素。

[0166] 进一步地，本发明还可以求解各衍射级次的偏振度 (Degree of Polarization, DoP)

$$[0167] DoP_{(m,n)} = \frac{\eta_{(m,n)}^{TE} - \eta_{(m,n)}^{TM}}{\eta_{(m,n)}^{TE} + \eta_{(m,n)}^{TM}} \cdot 100\% \quad (24)$$

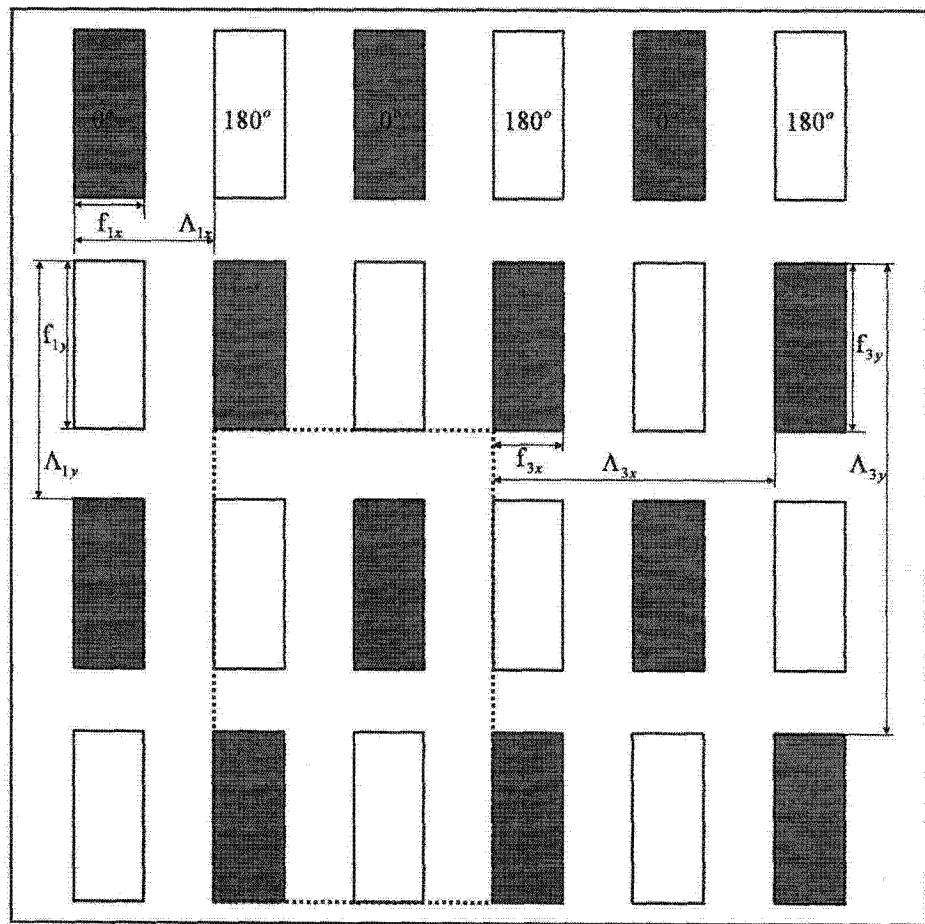
[0168] 其中当入射光为 TE 偏振光时, 将 $\eta_{(m,n)}$ 定义为 $\eta_{(m,n)}^{TE}$, 当入射光为 TM 偏振光时, 将 $\eta_{(m,n)}$ 定义为 $\eta_{(m,n)}^{TM}$ 。DoP 为正, 表示掩模类似 TE 偏振片, DoP 为负, 表示掩模类似 TM 偏振片。

[0169] 发明实例一:

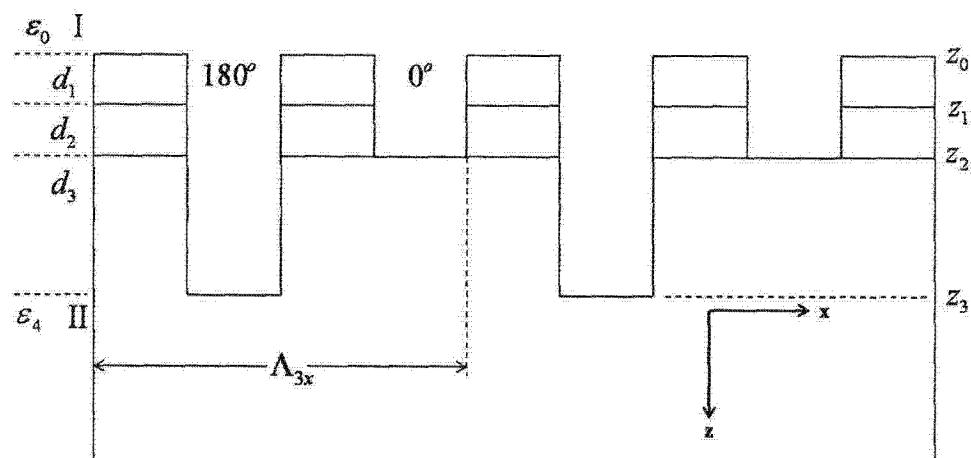
[0170] 这里计算了双吸收层 (Cr0/Cr) 交替相移接触孔掩模中, TE 锥形入射 ($\theta = 10^\circ$, $\varphi = 30^\circ$ 、 $\lambda = 193\text{nm}$) 时, 不同掩模线宽 (晶圆尺度) 时, $(0,0)$ 、 $(0,2)$ 、 $(1,1)$ 、 $(2,0)$ 级次的衍射效率。其中 Cr0 折射率、消光系数及厚度分别为 1.965、1.201 及 18nm. Cr 折射率、消光系数及厚度分别为 1.477、1.762 及 55nm. 掩模在 x 轴上的占空比为 0.5, 在 y 轴上的占空比为 0.6。

[0171] 图 16 为 TE 偏振光锥形入射 ($\theta = 10^\circ$, $\varphi = 30^\circ$ 、 $\lambda = 193\text{nm}$) 双吸收层 (Cr0/Cr) 交替相移接触孔掩模时, $(0,0)$ 、 $(0,2)$ 、 $(1,1)$ 、 $(2,0)$ 衍射级次的衍射效率随着特征尺寸 (晶圆尺度, nm) 的变化关系图。(a) $(0,0)$ 级光的衍射效率随线宽变化的关系图, (b) $(0,2)$ 级光的衍射效率随线宽变化的关系图, (c) $(1,1)$ 级光的衍射效率随线宽变化的关系图, (d) $(2,0)$ 级光的衍射效率随线宽变化的关系图。

[0172] 综上所述, 以上仅为本发明的较佳实施例而已, 并非用于限定本发明的保护范围。凡在本发明的精神和原则之内, 所作的任何修改、等同替换、改进等, 均应包含在本发明的保护范围之内。



(a)



(b)

图 1

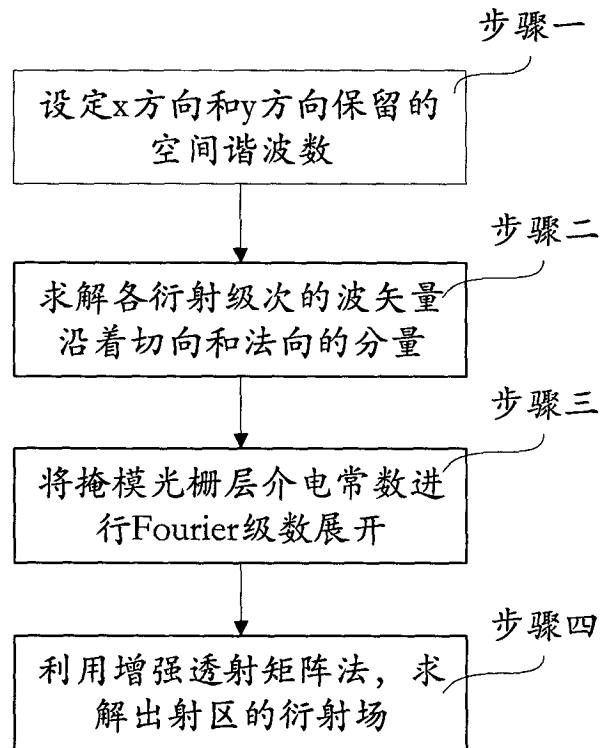


图 2

$$\mathbf{E}_\ell = \begin{bmatrix} \mathcal{E}_{\ell,(0,0)} & \mathcal{E}_{\ell,(-1,0)} & \mathcal{E}_{\ell,(-2,0)} & \mathcal{E}_{\ell,(0,-1)} & \mathcal{E}_{\ell,(-1,-1)} & \mathcal{E}_{\ell,(-2,-1)} & \mathcal{E}_{\ell,(0,-2)} & \mathcal{E}_{\ell,(-1,-2)} & \mathcal{E}_{\ell,(-2,-2)} \\ \mathcal{E}_{\ell,(1,0)} & \mathcal{E}_{\ell,(0,0)} & \mathcal{E}_{\ell,(-1,0)} & \mathcal{E}_{\ell,(1,-1)} & \mathcal{E}_{\ell,(0,-1)} & \mathcal{E}_{\ell,(-1,-1)} & \mathcal{E}_{\ell,(1,-2)} & \mathcal{E}_{\ell,(0,-2)} & \mathcal{E}_{\ell,(-1,-2)} \\ \mathcal{E}_{\ell,(2,0)} & \mathcal{E}_{\ell,(1,0)} & \mathcal{E}_{\ell,(0,0)} & \mathcal{E}_{\ell,(2,-1)} & \mathcal{E}_{\ell,(1,-1)} & \mathcal{E}_{\ell,(0,-1)} & \mathcal{E}_{\ell,(2,-2)} & \mathcal{E}_{\ell,(1,-2)} & \mathcal{E}_{\ell,(0,-2)} \\ \mathcal{E}_{\ell,(0,1)} & \mathcal{E}_{\ell,(-1,1)} & \mathcal{E}_{\ell,(-2,1)} & \mathcal{E}_{\ell,(0,0)} & \mathcal{E}_{\ell,(-1,0)} & \mathcal{E}_{\ell,(-2,0)} & \mathcal{E}_{\ell,(0,-1)} & \mathcal{E}_{\ell,(-1,-1)} & \mathcal{E}_{\ell,(-2,-1)} \\ \mathcal{E}_{\ell,(1,1)} & \mathcal{E}_{\ell,(0,1)} & \mathcal{E}_{\ell,(-1,1)} & \mathcal{E}_{\ell,(1,0)} & \mathcal{E}_{\ell,(0,0)} & \mathcal{E}_{\ell,(-1,0)} & \mathcal{E}_{\ell,(1,-1)} & \mathcal{E}_{\ell,(0,-1)} & \mathcal{E}_{\ell,(-1,-1)} \\ \mathcal{E}_{\ell,(2,1)} & \mathcal{E}_{\ell,(1,1)} & \mathcal{E}_{\ell,(0,1)} & \mathcal{E}_{\ell,(2,0)} & \mathcal{E}_{\ell,(1,0)} & \mathcal{E}_{\ell,(0,0)} & \mathcal{E}_{\ell,(2,-1)} & \mathcal{E}_{\ell,(1,-1)} & \mathcal{E}_{\ell,(0,-1)} \\ \mathcal{E}_{\ell,(0,2)} & \mathcal{E}_{\ell,(-1,2)} & \mathcal{E}_{\ell,(-2,2)} & \mathcal{E}_{\ell,(0,1)} & \mathcal{E}_{\ell,(-1,1)} & \mathcal{E}_{\ell,(-2,1)} & \mathcal{E}_{\ell,(0,0)} & \mathcal{E}_{\ell,(-1,0)} & \mathcal{E}_{\ell,(-2,0)} \\ \mathcal{E}_{\ell,(1,2)} & \mathcal{E}_{\ell,(0,2)} & \mathcal{E}_{\ell,(-1,2)} & \mathcal{E}_{\ell,(1,1)} & \mathcal{E}_{\ell,(0,1)} & \mathcal{E}_{\ell,(-1,1)} & \mathcal{E}_{\ell,(1,0)} & \mathcal{E}_{\ell,(0,0)} & \mathcal{E}_{\ell,(-1,0)} \\ \mathcal{E}_{\ell,(2,2)} & \mathcal{E}_{\ell,(1,2)} & \mathcal{E}_{\ell,(0,2)} & \mathcal{E}_{\ell,(2,1)} & \mathcal{E}_{\ell,(1,1)} & \mathcal{E}_{\ell,(0,1)} & \mathcal{E}_{\ell,(2,0)} & \mathcal{E}_{\ell,(1,0)} & \mathcal{E}_{\ell,(0,0)} \end{bmatrix}$$

冬 3

$$\mathbf{E}_{\ell'} = \begin{bmatrix} \mathcal{E}_{\ell',(0,0)} & \mathcal{E}_{\ell',(-1,0)} & \mathcal{E}_{\ell',(-2,0)} & \mathcal{E}_{\ell',(0,-1)} & \mathcal{E}_{\ell',(-1,-1)} & \mathcal{E}_{\ell',(-2,-1)} & \mathcal{E}_{\ell',(0,-2)} & \mathcal{E}_{\ell',(-1,-2)} & \mathcal{E}_{\ell',(-2,-2)} \\ \mathcal{E}_{\ell',(1,0)} & \mathcal{E}_{\ell',(0,0)} & \mathcal{E}_{\ell',(-1,0)} & \mathcal{E}_{\ell',(1,-1)} & \mathcal{E}_{\ell',(0,-1)} & \mathcal{E}_{\ell',(-1,-1)} & \mathcal{E}_{\ell',(1,-2)} & \mathcal{E}_{\ell',(0,-2)} & \mathcal{E}_{\ell',(-1,-2)} \\ \mathcal{E}_{\ell',(2,0)} & \mathcal{E}_{\ell',(1,0)} & \mathcal{E}_{\ell',(0,0)} & \mathcal{E}_{\ell',(2,-1)} & \mathcal{E}_{\ell',(1,-1)} & \mathcal{E}_{\ell',(0,-1)} & \mathcal{E}_{\ell',(2,-2)} & \mathcal{E}_{\ell',(1,-2)} & \mathcal{E}_{\ell',(0,-2)} \\ \mathcal{E}_{\ell',(0,1)} & \mathcal{E}_{\ell',(-1,1)} & \mathcal{E}_{\ell',(-2,1)} & \mathcal{E}_{\ell',(0,0)} & \mathcal{E}_{\ell',(-1,0)} & \mathcal{E}_{\ell',(-2,0)} & \mathcal{E}_{\ell',(0,-1)} & \mathcal{E}_{\ell',(-1,-1)} & \mathcal{E}_{\ell',(-2,-1)} \\ \mathcal{E}_{\ell',(1,1)} & \mathcal{E}_{\ell',(0,1)} & \mathcal{E}_{\ell',(-1,1)} & \mathcal{E}_{\ell',(1,0)} & \mathcal{E}_{\ell',(0,0)} & \mathcal{E}_{\ell',(-1,0)} & \mathcal{E}_{\ell',(1,-1)} & \mathcal{E}_{\ell',(0,-1)} & \mathcal{E}_{\ell',(-1,-1)} \\ \mathcal{E}_{\ell',(2,1)} & \mathcal{E}_{\ell',(1,1)} & \mathcal{E}_{\ell',(0,1)} & \mathcal{E}_{\ell',(2,0)} & \mathcal{E}_{\ell',(1,0)} & \mathcal{E}_{\ell',(0,0)} & \mathcal{E}_{\ell',(2,-1)} & \mathcal{E}_{\ell',(1,-1)} & \mathcal{E}_{\ell',(0,-1)} \\ \mathcal{E}_{\ell',(0,2)} & \mathcal{E}_{\ell',(-1,2)} & \mathcal{E}_{\ell',(-2,2)} & \mathcal{E}_{\ell',(0,1)} & \mathcal{E}_{\ell',(-1,1)} & \mathcal{E}_{\ell',(-2,1)} & \mathcal{E}_{\ell',(0,0)} & \mathcal{E}_{\ell',(-1,0)} & \mathcal{E}_{\ell',(-2,0)} \\ \mathcal{E}_{\ell',(1,2)} & \mathcal{E}_{\ell',(0,2)} & \mathcal{E}_{\ell',(-1,2)} & \mathcal{E}_{\ell',(1,1)} & \mathcal{E}_{\ell',(0,1)} & \mathcal{E}_{\ell',(-1,1)} & \mathcal{E}_{\ell',(1,0)} & \mathcal{E}_{\ell',(0,0)} & \mathcal{E}_{\ell',(-1,0)} \\ \mathcal{E}_{\ell',(2,2)} & \mathcal{E}_{\ell',(1,2)} & \mathcal{E}_{\ell',(0,2)} & \mathcal{E}_{\ell',(2,1)} & \mathcal{E}_{\ell',(1,1)} & \mathcal{E}_{\ell',(0,1)} & \mathcal{E}_{\ell',(2,0)} & \mathcal{E}_{\ell',(1,0)} & \mathcal{E}_{\ell',(0,0)} \end{bmatrix}$$

图 4

$$\mathbf{A}_{\ell} = \begin{bmatrix} \xi_{\ell,(0,0)} & \xi_{\ell,(-1,0)} & \xi_{\ell,(-2,0)} & \xi_{\ell,(0,-1)} & \xi_{\ell,(-1,-1)} & \xi_{\ell,(-2,-1)} & \xi_{\ell,(0,-2)} & \xi_{\ell,(-1,-2)} & \xi_{\ell,(-2,-2)} \\ \xi_{\ell,(1,0)} & \xi_{\ell,(0,0)} & \xi_{\ell,(-1,0)} & \xi_{\ell,(1,-1)} & \xi_{\ell,(0,-1)} & \xi_{\ell,(-1,-1)} & \xi_{\ell,(1,-2)} & \xi_{\ell,(0,-2)} & \xi_{\ell,(-1,-2)} \\ \xi_{\ell,(2,0)} & \xi_{\ell,(1,0)} & \xi_{\ell,(0,0)} & \xi_{\ell,(2,-1)} & \xi_{\ell,(1,-1)} & \xi_{\ell,(0,-1)} & \xi_{\ell,(2,-2)} & \xi_{\ell,(1,-2)} & \xi_{\ell,(0,-2)} \\ \xi_{\ell,(0,1)} & \xi_{\ell,(-1,1)} & \xi_{\ell,(-2,1)} & \xi_{\ell,(0,0)} & \xi_{\ell,(-1,0)} & \xi_{\ell,(-2,0)} & \xi_{\ell,(0,-1)} & \xi_{\ell,(-1,-1)} & \xi_{\ell,(-2,-1)} \\ \xi_{\ell,(1,1)} & \xi_{\ell,(0,1)} & \xi_{\ell,(-1,1)} & \xi_{\ell,(1,0)} & \xi_{\ell,(0,0)} & \xi_{\ell,(-1,0)} & \xi_{\ell,(1,-1)} & \xi_{\ell,(0,-1)} & \xi_{\ell,(-1,-1)} \\ \xi_{\ell,(2,1)} & \xi_{\ell,(1,1)} & \xi_{\ell,(0,1)} & \xi_{\ell,(2,0)} & \xi_{\ell,(1,0)} & \xi_{\ell,(0,0)} & \xi_{\ell,(2,-1)} & \xi_{\ell,(1,-1)} & \xi_{\ell,(0,-1)} \\ \xi_{\ell,(0,2)} & \xi_{\ell,(-1,2)} & \xi_{\ell,(-2,2)} & \xi_{\ell,(0,1)} & \xi_{\ell,(-1,1)} & \xi_{\ell,(-2,1)} & \xi_{\ell,(0,0)} & \xi_{\ell,(-1,0)} & \xi_{\ell,(-2,0)} \\ \xi_{\ell,(1,2)} & \xi_{\ell,(0,2)} & \xi_{\ell,(-1,2)} & \xi_{\ell,(1,1)} & \xi_{\ell,(0,1)} & \xi_{\ell,(-1,1)} & \xi_{\ell,(1,0)} & \xi_{\ell,(0,0)} & \xi_{\ell,(-1,0)} \\ \xi_{\ell,(2,2)} & \xi_{\ell,(1,2)} & \xi_{\ell,(0,2)} & \xi_{\ell,(2,1)} & \xi_{\ell,(1,1)} & \xi_{\ell,(0,1)} & \xi_{\ell,(2,0)} & \xi_{\ell,(1,0)} & \xi_{\ell,(0,0)} \end{bmatrix}$$

图 5

$$\mathbf{A}_{\ell'} = \begin{bmatrix} \xi_{\ell',(0,0)} & \xi_{\ell',(-1,0)} & \xi_{\ell',(-2,0)} & \xi_{\ell',(0,-1)} & \xi_{\ell',(-1,-1)} & \xi_{\ell',(-2,-1)} & \xi_{\ell',(0,-2)} & \xi_{\ell',(-1,-2)} & \xi_{\ell',(-2,-2)} \\ \xi_{\ell',(1,0)} & \xi_{\ell',(0,0)} & \xi_{\ell',(-1,0)} & \xi_{\ell',(1,-1)} & \xi_{\ell',(0,-1)} & \xi_{\ell',(-1,-1)} & \xi_{\ell',(1,-2)} & \xi_{\ell',(0,-2)} & \xi_{\ell',(-1,-2)} \\ \xi_{\ell',(2,0)} & \xi_{\ell',(1,0)} & \xi_{\ell',(0,0)} & \xi_{\ell',(2,-1)} & \xi_{\ell',(1,-1)} & \xi_{\ell',(0,-1)} & \xi_{\ell',(2,-2)} & \xi_{\ell',(1,-2)} & \xi_{\ell',(0,-2)} \\ \xi_{\ell',(0,1)} & \xi_{\ell',(-1,1)} & \xi_{\ell',(-2,1)} & \xi_{\ell',(0,0)} & \xi_{\ell',(-1,0)} & \xi_{\ell',(-2,0)} & \xi_{\ell',(0,-1)} & \xi_{\ell',(-1,-1)} & \xi_{\ell',(-2,-1)} \\ \xi_{\ell',(1,1)} & \xi_{\ell',(0,1)} & \xi_{\ell',(-1,1)} & \xi_{\ell',(1,0)} & \xi_{\ell',(0,0)} & \xi_{\ell',(-1,0)} & \xi_{\ell',(1,-1)} & \xi_{\ell',(0,-1)} & \xi_{\ell',(-1,-1)} \\ \xi_{\ell',(2,1)} & \xi_{\ell',(1,1)} & \xi_{\ell',(0,1)} & \xi_{\ell',(2,0)} & \xi_{\ell',(1,0)} & \xi_{\ell',(0,0)} & \xi_{\ell',(2,-1)} & \xi_{\ell',(1,-1)} & \xi_{\ell',(0,-1)} \\ \xi_{\ell',(0,2)} & \xi_{\ell',(-1,2)} & \xi_{\ell',(-2,2)} & \xi_{\ell',(0,1)} & \xi_{\ell',(-1,1)} & \xi_{\ell',(-2,1)} & \xi_{\ell',(0,0)} & \xi_{\ell',(-1,0)} & \xi_{\ell',(-2,0)} \\ \xi_{\ell',(1,2)} & \xi_{\ell',(0,2)} & \xi_{\ell',(-1,2)} & \xi_{\ell',(1,1)} & \xi_{\ell',(0,1)} & \xi_{\ell',(-1,1)} & \xi_{\ell',(1,0)} & \xi_{\ell',(0,0)} & \xi_{\ell',(-1,0)} \\ \xi_{\ell',(2,2)} & \xi_{\ell',(1,2)} & \xi_{\ell',(0,2)} & \xi_{\ell',(2,1)} & \xi_{\ell',(1,1)} & \xi_{\ell',(0,1)} & \xi_{\ell',(2,0)} & \xi_{\ell',(1,0)} & \xi_{\ell',(0,0)} \end{bmatrix}$$

图 6

$$\mathbf{K}_x = \begin{bmatrix} \alpha_{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_1 \end{bmatrix}$$

图 7

$$\mathbf{K}_y = \begin{bmatrix} \beta_{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta_{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

图 8

图 9

$$\mathbf{Y}_I = \frac{1}{k} \begin{bmatrix} r_{(-1,-1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_{(0,-1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_{(1,-1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{(-1,0)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_{(0,0)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{(1,0)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{(-1,1)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{(0,1)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{(1,1)} \end{bmatrix}$$

图 10

$$\mathbf{Z}_I = \frac{1}{kn_I^2} \begin{bmatrix} r_{(-1,-1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_{(0,-1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_{(1,-1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{(-1,0)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_{(0,0)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{(1,0)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{(-1,1)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{(0,1)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{(1,1)} \end{bmatrix}$$

图 11

$$\mathbf{Y}_{II} = \frac{1}{k} \begin{bmatrix} t_{(-1,-1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & t_{(0,-1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & t_{(1,-1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & t_{(-1,0)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & t_{(0,0)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & t_{(1,0)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & t_{(-1,1)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & t_{(0,1)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & t_{(1,1)} \end{bmatrix}$$

图 12

$$\mathbf{Z}_{\text{II}} = \frac{1}{kn_1^2} \begin{bmatrix} t_{(-1,-1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & t_{(0,-1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & t_{(1,-1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & t_{(-1,0)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & t_{(0,0)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & t_{(1,0)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & t_{(-1,1)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & t_{(0,1)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & t_{(1,1)} \end{bmatrix}$$

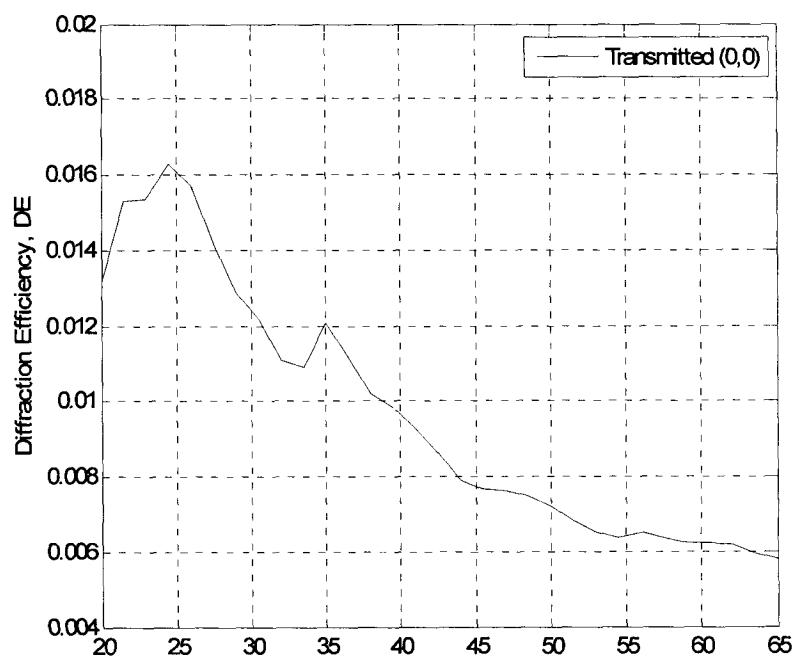
图 13

$$\mathbf{F}_C = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{(-1,-1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_{(0,-1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \varphi_{(1,-1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \varphi_{(-1,0)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \varphi_{(0,0)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \varphi_{(1,0)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \varphi_{(-1,1)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \varphi_{(0,1)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \varphi_{(1,1)} \end{bmatrix}$$

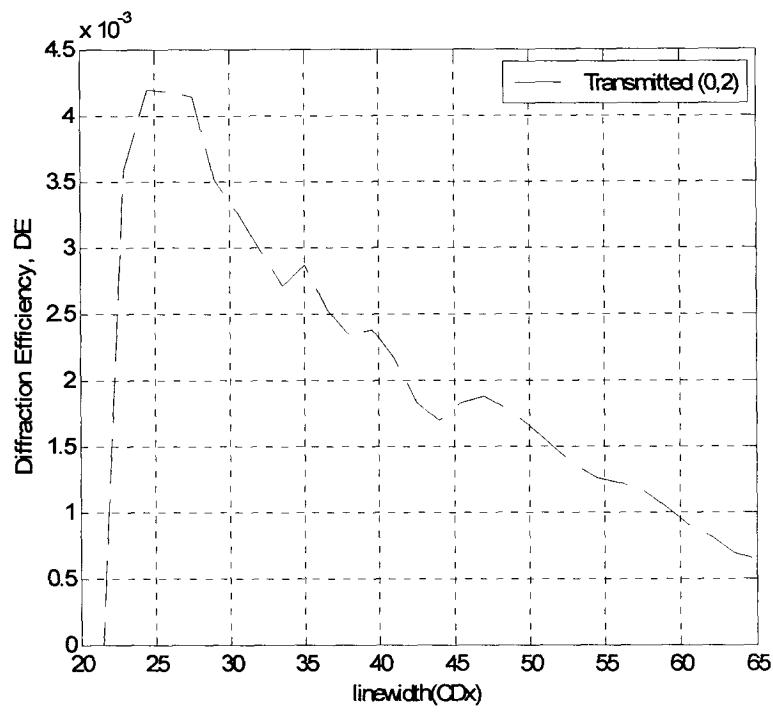
图 14

$$\mathbf{F}_S = \begin{bmatrix} \sin \varphi_{(-1,-1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \varphi_{(0,-1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin \varphi_{(1,-1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin \varphi_{(-1,0)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sin \varphi_{(0,0)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sin \varphi_{(1,0)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sin \varphi_{(-1,1)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sin \varphi_{(0,1)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sin \varphi_{(1,1)} \end{bmatrix}$$

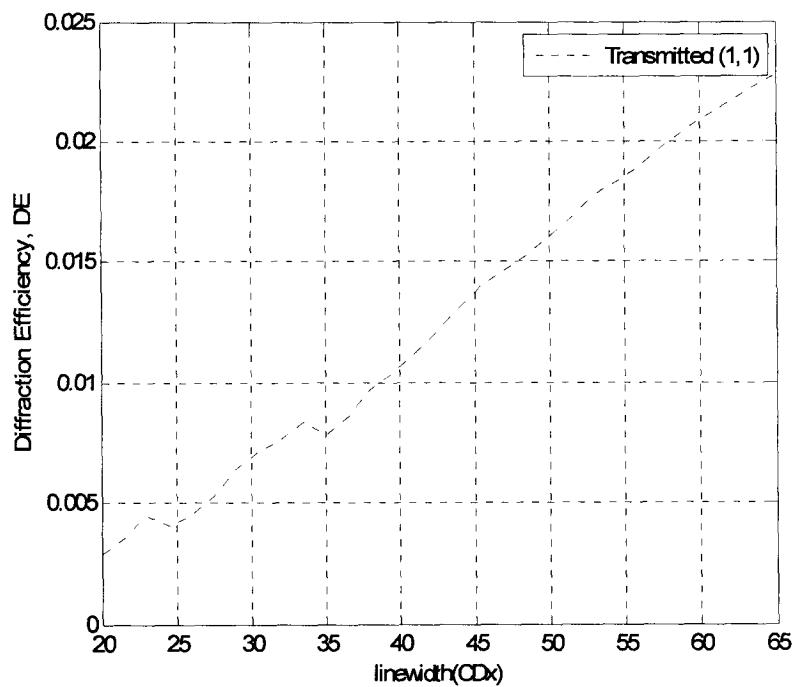
图 15



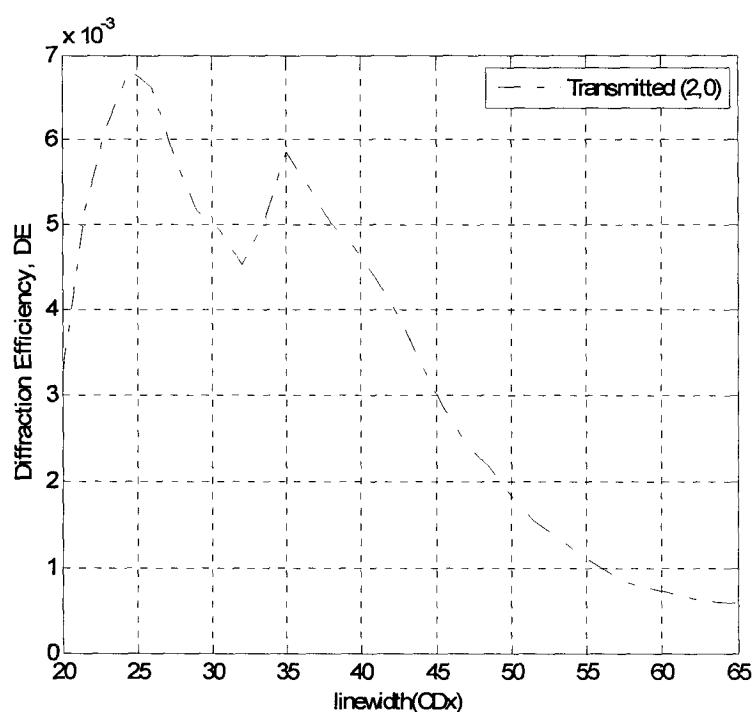
(a)



(b)



(c)



(d)

图 16