

透射型亚波长二元闪耀光栅的数值模拟与分析

蔡勇¹, 朱京平², 马志强¹, 钱渊¹

(1. 空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077; 2. 西安交通大学 电信学院, 陕西 西安 710049)

摘要:使用 OptiFDTD 对透射型亚波长二元闪耀光栅的透射场进行了数值模拟;使用 FFT 方法对电磁场分量进行分析,得到其各个级次的能量分布,进而分析了亚波长结构二元光栅的各个参数对衍射性能的影响。分析结果证实:透射型亚波长二元闪耀光栅可将正入射的 TE 波闪耀到 +1 级,且等分数对衍射角影响很小。给定波长,其设计主要由光栅周期、光栅材料折射率和等分数这 3 个参数决定。

关键词:亚波长结构二元闪耀光栅;OptiFDTD;FFT

中图分类号: TN256 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2007)03-0081-03

关于亚波长二元衍射光栅的分析方法,等效介质理论^[1-2]和严格耦合波理论用的较多。文献[3]比较了二元衍射光栅常用的 3 种分析方法。国内关于二元闪耀光栅的报道不多,文献[4]采用 FDTD 方法,用二维 FDTD 模拟计算了 1D 结构的二元闪耀光栅的一阶衍射效率和衍射角度随光栅不同结构参数变化的相关特征。本文使用专用专业分析设计软件 OptiFDTD(时域光子学仿真软件)对透射型亚波长二元光栅进行数值模拟。

1 亚波长二元闪耀光栅模型

为方便起见,不妨设周期 $T=1$,光栅由 I 个矩形齿组成,即等分数为 I ,矩形齿前后坐标分别为 α_i 和 β_i , $\alpha_i = i/(I+1)$, $\beta_i = i/(i+I)$ 。光栅材料折射率为 n_0 ,厚度 $d = \lambda/(n_0 - 1)$ 。容易得到,光栅第一个子周期的占空比为 $1/(I+1)$,第二个子周期的占空比为 $2/(I+1)$,光栅第 i 个子周期的占空比为 $i/(I+1)$ 。

一般地,给定波长 λ ,透射型二元闪耀光栅的设计主要根据 3 个参数:光栅周期 T ,材料折射率 n_0 ,等分数 I 。关于参数的选取,应当根据工艺情况、实际需要以及模拟结果进行考虑。

在数值模拟过程中采用 OptiFDTD 软件,其核心程序是基于二阶数值精度的时域有限差分算法和周期边界条件。它主要有以下模块功能:OptiFDTD 设计器,OptiFDTD 模拟器;OptiFDTD 分析仪。

2 数据模拟与分析

2.1 周期边界条件及模拟分析步骤

- 1) 采用周期边界条件,使用 OptiFDTD 设计器构造出光栅单周期结构,如图 1 所示。
- 2) 利用 OptiFDTD 模拟器计算出场分布;
- 3) 用 FFT 分析电磁场 E_y 分量的离散点数值,得到其各空间角谱分量。

2.2 数值模拟与分析

1) 透射二元光栅置于空气中,TE 波正入射情况下,入射波长 $\lambda = 1\ 552.52\ \text{nm}$, $T = 7\ 762.6\ \text{nm}$,等分数 $I = 20$,光栅高度 $d = 100\ \text{nm}, \dots, 3\ 000\ \text{nm}$;按照 $100\ \text{nm}$ 递增; $d = 1\ 352\ \text{nm}$ (理论最优解)单独计算一次。模拟结果如图 2 所示。

收稿日期:2006-10-09

基金项目:国家自然科学基金资助(60377020)

作者简介:蔡勇(1979-),男,河南新野人,讲师,硕士,主要从事军事通信学研究;

朱京平(1967-),女,陕西西安人,教授,博士生导师,主要从事光通信研究。

从图2中可以看出,当 $d = 1\ 352\ \text{nm}$ 时,透射二元闪耀光栅有较高的一级衍射效率66.7%。在其它情况下,光栅的一级衍射效率较低。 $d = 1\ 352\ \text{nm}$ 时,各个级次的能量分布如图3所示。

2) TE波正入射情况下,入射波长 $\lambda = 1\ 552.52\ \text{nm}$, $T = 7\ 762.6\ \text{nm}$, $d = 1\ 352\ \text{nm}$, $I = 10, \dots, 23$;以单位1递增,确定一个 I 值(此时衍射效率取得最佳值),如图4所示。对于透射二元光栅而言,固定周期 T 和齿高 d 就可以得到特定的闪耀级次;齿数越多,显然对锯齿型闪耀光栅的近似程度越高,相应的衍射特性也越接近于锯齿型闪耀光栅。但是过密的话,会出现小尺寸引起的量子效应,从而引发新的现象,有可能反而使闪耀方一向的衍射效率下降^[4]。从图4中可以看出,当 $I = 12$ 时,透射二元闪耀光栅取得最大的一级衍射效率67.9%。12等分与20等分的结果基本上相同。由于等分数越少,相应制作越简单,所以若二元闪耀光栅是用来得到特定的闪耀角的话,12等分即可。

3) TE波正入射情况下,入射波长 $\lambda = 1\ 552.52\ \text{nm}$,根据前两步模拟结果,确定出 $I = 12$ 和 $d = 1\ 352\ \text{nm}$ 时,衍射效率取得最佳值,改变周期,得到一个最佳周期。模拟计算了 $T = 5\lambda - 10\lambda$,这里只选取了 $T = 5\lambda, 6\lambda, 7\lambda, 8\lambda$ 的情况做一对比。如图5所示。

4) TE波正入射情况下,入射波长 $\lambda = 1\ 552.52\ \text{nm}$, $T = 7\ 762.6\ \text{nm}$, $d = 1\ 352\ \text{nm}$, $I = 10, \dots, 23$;以单位1递增,确定一个 I 值,计算模拟得到的结果表明等分数对+1级的衍射角基本没有影响。

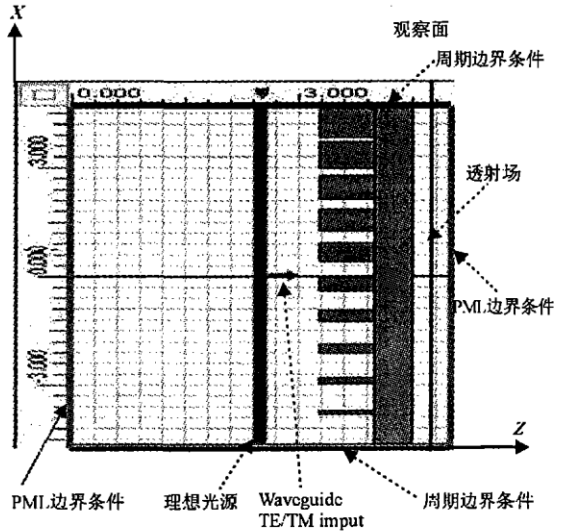


图1 周期边界条件及光栅单周期结构图

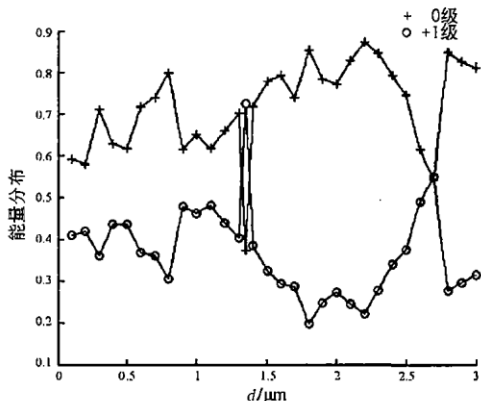


图2 固定 T, I ,光栅深度 d 变化, 0级+1级能量分布图

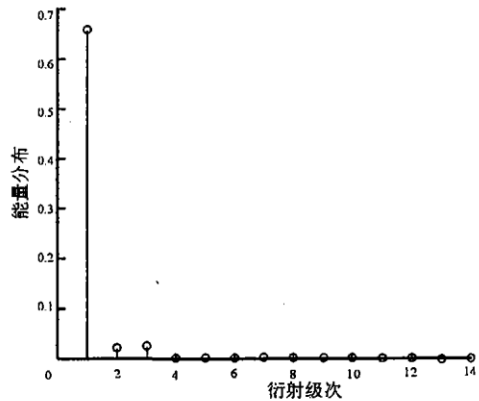


图3 $T = 7\ 762.6\ \text{nm}, I = 20, d = 1\ 352\ \text{nm}$ 时, 各个级次能量分布图

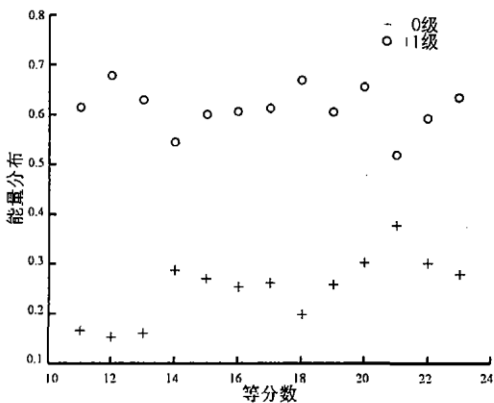


图4 固定 T, d ,等分数 I 变化, 0级+1级能量分布图

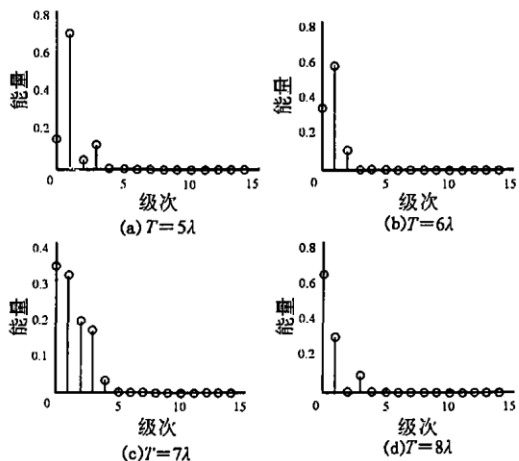


图5 固定 I, d ,周期变化各级次能量分布图

3 结束语

采用 OptiFDTD 和 FFT 方法模拟分析了光栅周期, 等分数 I , 以及深度 d 对透射型亚波长二元衍射光栅衍射效率的影响。结果表明, 透射型二元闪耀光栅可将正入射的 TE 波闪耀到 +1 级, 一级衍射效率最高为 67.9%, 且等分数对衍射角影响很小, 给定波长, 其设计主要由光栅周期、光栅材料折射率和等分数这 3 个参数决定。我们并没有讨论这种光栅的角色散、线色散以及分辨率等重要参数性能, 也没有考虑光栅放置在材料折射率为 n 的介质中的情况。但是这对于理解二元闪耀光栅原理有借鉴作用。

参考文献:

- [1] Philippe Lalanne, Dominique Lemerrier - Lalanne On the Effective Medium Theory of Subwavelength Periodic Structures [J]. Journal of Modern Optics, 1996, 43(10): 2063 - 2085.
- [2] Charles W, Haggans, Lifeng Li, et al. Effective - Medium Theory of Zeroth - order Lamellar Gratings in Conical Mountings [J]. J Opt Soc, 1993, 10: 2217 - 2225.
- [3] Richter I, Rzyz Z, Fiala P. Analysis of Binary Diffraction Gratings: Comparison of Different Approaches [J]. Journal of Modern Optics, 1998, 45(7): 1335 - 1355.
- [4] 周慧君, 王取泉, 闪耀光栅的二元近似结构 [J]. 光学与光电技术, 2005, 3(3): 61 - 64.

(编辑: 门向生)

Numerical Simulation and Analysis of Transmission Sub - wavelength Binary Gratings

CAI Yong¹, ZHU Jing - ping², MA Zhi - qiang¹, QIAN Yuan¹

(1. The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China; 2. School of Electronic & Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: OptiFDTD and Fast Fourier Transform method are used to simulate and analyze the diffracted field of transmission sub - wavelength binary gratings (TSBG). And the influence of grating parameters on the diffraction efficiency is numerically analyzed. The analysis result demonstrates that, for TSBG, the normal incident TE mode beam can be diffracted to the +1st order, the interval number has few influence on diffracted angle, the performance of a TSBG is determined by the grating period, material index and interval number for a given wavelength.

Key words: transmission sub - wavelength binary gratings; OptiFDTD; FFT

(上接第 80 页)

An Edge Preserved Image Interpolation Method

ZHANG Xiong, BI Du - yan, YANG Bao - qiang

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: In the process of image super - resolution reconstruction, there is a need for interpolating pixels in the low - resolution image. On the basis of detecting the edge of low - resolution image and in consideration of its direction, the pixels belong to edges in the reconstructing high - resolution image are interpolated at first. Then, other zero - padding pixels are interpolated by using the bi - cubic method. By comparison with the results of nearest - neighborhood interpolation, bi - linear interpolation and the traditional bi - cubic interpolation, the result of this experiment on Lena image shows that the image edges are better persevered.

Key words: super - resolution reconstruction; interpolation; edge preserved; high resolution