

新型一维复合光栅的光学反射特性分析

梁 军, 沈宏君*, 蒙玉进, 龙 庆

宁夏大学物理与电子电气工程学院, 宁夏 银川
Email: *shenhongj2004@126.com

收稿日期: 2020年12月28日; 录用日期: 2021年3月1日; 发布日期: 2021年3月8日

摘 要

利用严格耦合波分析法(RCWA)分别计算了TE入射、TM入射和锥形入射下不同占空比的复合光栅的反射率, 分别从波长、光栅槽深度 d 和光栅周期等结构参数进行数值模拟。计算结果表明: 周期为 $2\ \mu\text{m}$, 光栅厚度为 $1\ \mu\text{m}$, 占空比为 f_1 、 f_2 、 f_3 的新型一维复合光栅结构反射达到了预期效果, 符合初期对复合光栅的设想。对于光通信器件, 波长为 $1.55\ \mu\text{m}$ 的复合光栅具有更好的信息保护和防丢失能力; 光栅槽深度 d 为 $0.5\ \mu\text{m}$ 时, TE入射情况下的特定复合光栅的反射率收敛于78%; 同一反射率下, 复合光栅的光栅周期要比矩形光栅小, 节约了实际成本, 并且在TM入射情况下, 复合光栅的反射率范围更广。对一维复合光栅反射特性的研究, 优化了光通信器件对于信息的保护, 使得反射率可以收敛于特定值, 也为实际工艺提供了光栅设计和制作理论。

关键词

严格耦合波理论, 复合光栅, 反射率, 数值模拟

Analysis of Optical Reflection Characteristics of a New One-Dimensional Compound Grating

Jun Liang, Hongjun Shen*, Yujin Meng, Qing Long

School of Physics and Electrical Engineering, Ningxia University, Yinchuan Ningxia
Email: *shenhongj2004@126.com

Received: Dec. 28th, 2020; accepted: Mar. 1st, 2021; published: Mar. 8th, 2021

Abstract

The reflection efficiency of compound grating with different ratio (duty cycle) under TE incident,

*通讯作者。

TM incident and conical incident was calculated by using strict coupled wave analysis (RCWA), and the structural parameters such as wavelength, normalized groove depth and grating period were simulated. The results show that the reflection of the new one-dimensional composite grating structure with period of 2 μm , grating thickness of 1 μm , duty cycle of f_1, f_2, f_3 , has achieved the desired results, in line with the initial idea of composite grating. For optical communication devices, the composite grating with wavelength of 1.55 μm has better information protection and anti-loss ability. When the normalized groove depth is 0.5 μm , the reflection efficiency of the specific composite grating under TE incidence converges to 78%; under the same reflection efficiency, the grating period of composite grating is smaller than that of rectangular grating, which saves the actual cost, and the reflection efficiency range of composite grating is wider under TM incidence. The research on the reflection characteristics of one-dimensional composite grating optimizes the information protection of optical communication devices, so that the reflection efficiency can converge to a specific value. It also provides the grating design and fabrication theory for the actual process.

Keywords

RCWA, Compound Grating, Reflection Efficiency, Numerical Simulation

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,国内外学者对亚波长浮雕表面设计进行深入的探索与研究。在过去的30年里,严格耦合波分析(RCWA)一直是用周期结构精确分析电磁波衍射的最广泛的方法。它已成功和准确地用于分析全息和表面浮雕光栅结构。1995年, M. G. Moharam 等人总结提出了一种严格耦合波分析方法,并且他们在表面浮雕光栅结构中进行了大量的研究[1] [2] [3]。

随着对光栅效率的要求不断严格,复合光栅成为了近年用来提高效率的高效结构和特殊需求效率的结构,并应用在各个领域。2004年,何俊发等人研究了复合光栅滤波在光学图像识别中的应用,用复合光栅滤波进行图像微分,适用于各种图像,通用性较好,并且可显著改善相关信号的性能[4]。2011年,傅正平等研究了金属光栅的光学反射吸收,分析了三种共振机理的相互作用,并确认了第四种共振形式,即相位共振,增加了对金属光栅共振吸收模式及其相互作用的认识[5] [6]。2013年,王东辉等人研究了一种基于复合光栅的新型光位移传感器,传感器能将误差信号从位移信号中剥离出来,很好地解决了传感器机械变型造成的误差问题[7]。2014年,尤勳等人提出了一种新型的耦合光栅,并对其进行了衍射特性分析[8]。2014年,杨亮等人对嵌入式光栅多层结构锥形衍射的严格耦合波理论进行了研究[9]。2015年,孙小亮等人研究了复合金属光栅模式分离与高性能气体传感器的应用,复合光栅 SPR 传感器具有超高品质因数的性能,使得它在生物化学传感领域中有巨大的应用潜力[10]。2016年, Jun Wu 对金属介质多层光栅结构的宽带光吸收进行了讨论,研究了 TE 和 TM 极化在几个选定波长下的电磁场分布,揭示了其宽带吸收机理,预计所设计的宽带吸收器可应用于热发射、红外隐身和太阳能采集等领域[11]。2020年,艾康等人提出了新型多晶硅发光器件的设计与实现,对量子效率和光电转换效率进行计算,验证了所研究结构通过载流子注入实现了碰撞电离率的提高,进而实现了发光效率的提高[12]。复合光栅引入了新的可调节的结构参量,从而在光栅反射特性方面有更大的灵活性。对复合光栅反射特性的研究有助于更好地设计光栅结构,得到所需要光学特性的光栅。

本文提出了一种新型一维复合光栅,并对其进行了反射特性分析。第1部分是对RCWA方法的简介,其中提到了建模模型,以及麦克斯韦方程的进一步计算和在边界条件的计算。第2部分是对提出的新型复合光栅进行了相对介电常数的计算。第3部分得出了反射率随着波长、光栅槽深度 d 、光栅周期的变化关系图,并对所得到的仿真结果进行了数值分析。确认了复合光栅具有比矩形光栅更优的反射率,并进一步研究了波长、光栅槽深度 d 和光栅周期如何影响不同占空比下的复合光栅的反射率。

2. RCWA 的内容简介

一般的三维二元光栅衍射问题如图1所示,平面图如图2所示。由于耦合光栅的特征尺寸在波长量级,本文选择了RCWA进行矢量计算,用来求得各级衍射效率的严格解。RCWA的出发点在于各层相应级次的横向谐波耦合,即空间频率需要保持一致。

在光栅区域($0 < z < d$)中,周期相对介电常数在形式的傅里叶级数中是可展开的:

$$\varepsilon(x, z) = \sum_p \varepsilon_p(z) \exp\left(j \frac{2\pi p}{\Lambda} x\right) \quad (1)$$

其中 $\varepsilon_p(z)$ 是光栅区域相对介电常数的第 p 傅里叶分量,对于有耗或非对称介质光栅而言,该分量是复杂的。

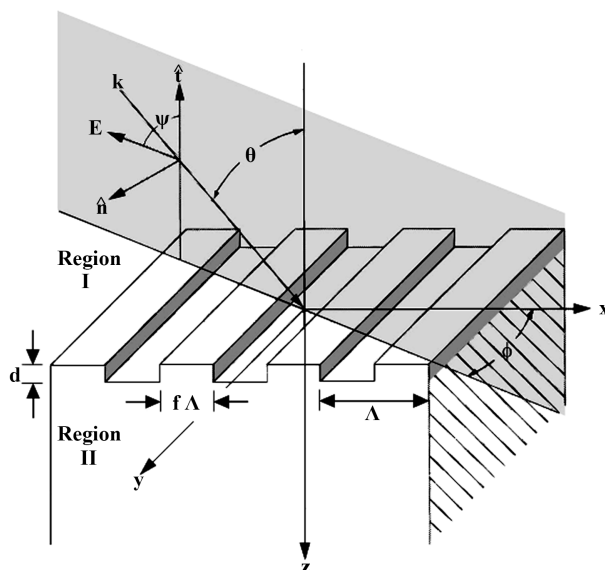


Figure 1. Geometrical properties of the diffraction problem of a binary rectangular groove grating
图 1. 分析了二元矩形沟槽光栅衍射问题的几何性质

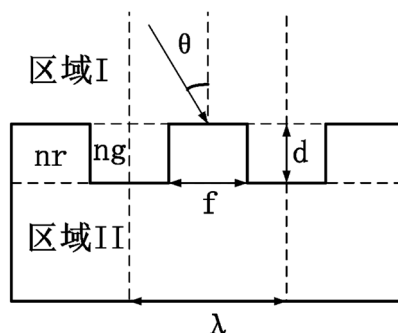


Figure 2. Plane of dual rectangular groove grating
图 2. 矩形沟槽光栅平面图

对于具有交变折射率区域的光栅结构, 如图 1 所示, 给出了 n_r 和 n_g 的傅里叶谐波:

$$\varepsilon_0 = n_r^2 f + n_g^2 (1 - f) \quad (2)$$

$$\varepsilon_p = (n_r^2 - n_g^2) \frac{\sin(\pi p f)}{\pi p} \quad (3)$$

其中, f 是折射率, 为 n_r 的区域所占光栅周期的分数, ε_0 是相对介电常数的平均值, 而不是自由空间的介电常数。以 TE 入射为例, 由入射归一化电场 $E_{inc,y}$ 求出入射 ($z > 0$) 与透射 ($z > d$) 区域的电场表达式 $E_{l,y}$ 和 $E_{ll,y}$:

$$E_{inc,y} = \exp[-jk_0 n_r (\sin \theta x + \cos \theta z)] \quad (4)$$

$$E_{l,y} = E_{inc,y} + \sum_i R_i \exp[-j(k_{xi} x - k_{l,zi} z)] \quad (5)$$

$$E_{ll,y} = \sum_i T_i \exp\{-j[k_{xi} x - k_{ll,zi} (z - d)]\} \quad (6)$$

在光栅区域 ($0 < z < d$) 中, 切向电场 E_{gy} (y 分量) 和切向磁场 H_{gx} (x 分量) 可以用傅里叶展开表示, 其空间谐波场为

$$E_{gy} = \sum_i S_{yi}(z) \exp(-jk_{xi} x) \quad (7)$$

$$H_{gx} = -j \left(\frac{\varepsilon_0}{\mu_0} \right)^{1/2} \sum_i U_{xi}(z) \exp(-jk_{xi} x) \quad (8)$$

结合光栅内的介电常数 $\varepsilon(x, z)$ 并在 $z = 0$ 和 $z = d$ 处运用边界条件, 得到不同介质分界面电磁场的连续分量, 列方程组即可求解各衍射级次的能量。

3. 新型一维复合光栅结构

在新型二元矩形沟槽光栅中, 选取金属铝光栅材料折射率为 $n_{ll} = 0.22 - 6.71 * 1i$, 经严格计算得出新的 ε_p , 新光栅区域的 n_r 和 n_g 的傅里叶谐波如下(8)式:

$$\varepsilon_0 = n_r^2 (f_1 + f_2 + f_3) + n_g^2 (1 - f_1 - f_2 - f_3) \quad (9)$$

$$\varepsilon_p = (n_r^2 - n_g^2) \left[\frac{\sin(\pi p)}{\pi p} + \frac{\sin(\pi p a)}{\pi p} - \frac{\sin(\pi p b)}{\pi p} \right] \quad (10)$$

$$a = \frac{L_1}{\lambda}, b = \frac{L_1 + 2L_2}{\lambda} \quad (11)$$

$$f_1 = \frac{L_3}{2\lambda}, f_2 = \frac{L_1}{\lambda}, f_3 = \frac{L_3}{2\lambda} \quad (12)$$

除了研究 TE、TM 入射情况外, 我们还研究了锥形入射的情况。在第 I 区域, 入射的归一化电场向量为:

$$\mathbf{E}_{inc} = \mathbf{u} \exp[-jk_0 n_r (\sin \theta \cos \phi x + \sin \theta \sin \phi y + \cos \theta z)] \quad (13)$$

$$\mathbf{u} = (\cos \psi \cos \theta \cos \phi - \sin \psi \sin \phi) \mathbf{x} + (\cos \psi \cos \theta \sin \phi + \sin \psi \cos \phi) \mathbf{y} - \cos \psi \sin \theta \mathbf{z} \quad (14)$$

其中 ψ 是电场矢量与入射平面的夹角, 对于 $\psi = 0^\circ$ 和 $\psi = 90^\circ$, 磁场和电场分别垂直于入射平面, ϕ 是方位角。

经部分程序改编后, 得到新的复合光栅场分布图如图 4。

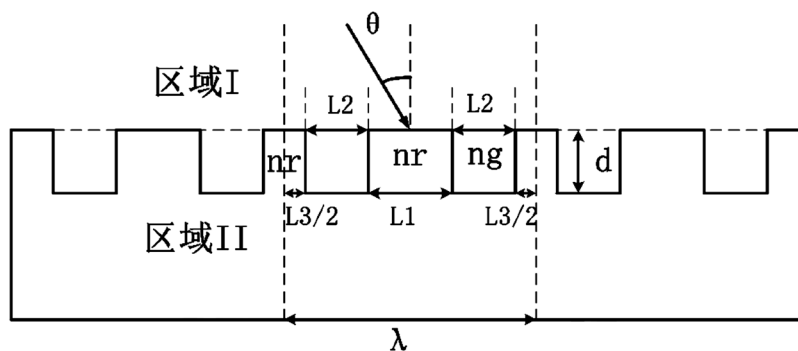


Figure 3. Plane of a novel dual rectangular groove grating

图 3. 新型矩形沟槽光栅平面图

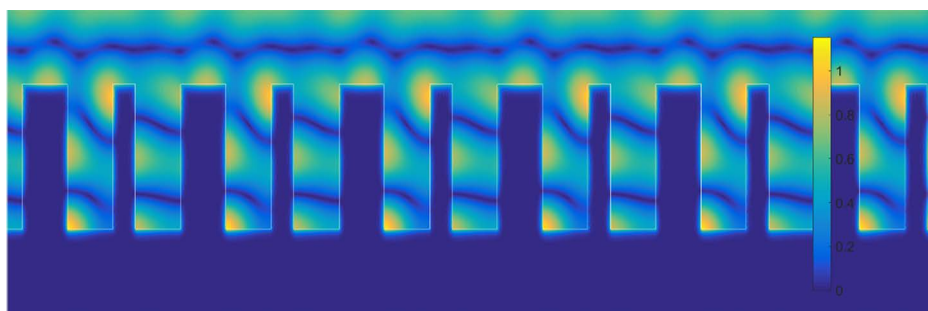


Figure 4. Grating field distribution (conical diffraction $\lambda = 2 \mu\text{m}$, $\theta = 30^\circ$, $\phi = 30^\circ$, $\psi = 45^\circ$, $n_t = 1$, $n_{II} = n_{rd} = 0.22 - 6.71 * i$)

图 4. 光栅场分布(锥形衍射, $\lambda = 2 \mu\text{m}$, $\theta = 30^\circ$, $\phi = 30^\circ$, $\psi = 45^\circ$, $n_t = 1$, $n_{II} = n_{rd} = 0.22 - 6.71 * i$)

图 4 中可以明显的看到光栅边界(白色边框), 得出的光栅场分布图也与设想一致, 进一步证实与图 3 所提出的光栅平面图相符。图 4 显示了复合光栅结构在 $\lambda = 2 \mu\text{m}$ 处对应的电场强度分布。从图 4 中可知, 电场主要局域在凹槽中, 但电场强度较弱, 其原因是光栅宽度较小, 光波主要在凹槽中耦合 SPW, 且大部分光被散射掉。

4. 仿真与结果分析

为了比较新型复合光栅的性能, 图 5、图 6、图 7 给出了不同占空比下的复合光栅与矩形光栅随波长、光栅槽深度 d 和光栅周期变化的反射率。经过程序的多次计算, 选定 $L3:L1 = 2:4$ 的不同占空比下的复合光栅与矩形光栅进行比较。

4.1. 反射率随波长的变化

经过多组实验数据的对比, 图 5 选定光栅周期为 $2 \mu\text{m}$, 光栅槽深度 d 为 $1 \mu\text{m}$, 入射角度为 $\theta = 10^\circ$, $\phi = 30^\circ$, $\psi = 45^\circ$, 此时波长变化时, 光栅可以获得反射率的峰值和谷值, 可以应用在光通信器件中, 光通信中的常用波长是 $1.55 \mu\text{m}$ 、 $1.31 \mu\text{m}$ 、 $0.85 \mu\text{m}$ 。

图 5(a)表示的是 TM 入射情况下各不同占空比的复合光栅与矩形光栅计算时入射波长的变化和反射率之间的关系曲线。当波长等于 $2 \mu\text{m}$ 时, 三种复合光栅的反射率要明显低于矩形光栅。对于要求低反射率的波导器件来说, 复合光栅的特性更符合要求的。复合光栅的反射率在波长 $1.6 \sim 3 \mu\text{m}$ 时, 要比矩形光栅更稳定。在光通信波长为 $1.31 \mu\text{m}$ 时, 复合光栅($L2:L1 = 2:4$)的反射率要更好, 为光通信信息保护和防信息丢失方面提供了更好的波导选择。

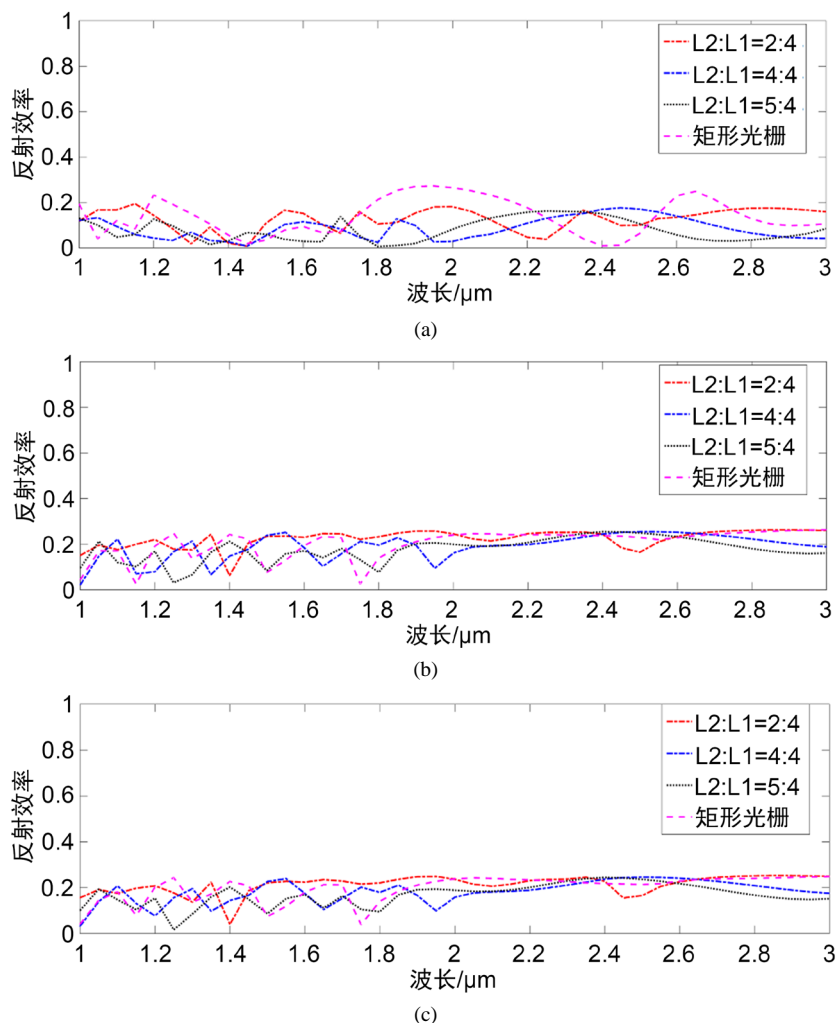


Figure 5. The variation of reflection efficiency with wavelength
图 5. 反射率随波长的变化

作为对比，图 5(b)和图 5(c)分别给出了TE入射和锥形入射情况下，不同占空比的复合光栅与矩形光栅计算时入射波长的变化和反射率之间的关系曲线。在可见光的波长范围内，L2:L1 的比值等于 2:4、5:4 的情况下复合光栅的反射率要明显的好于矩形光栅。在不可见的部分波长范围里，只有L2:L1 的比值等于 2:4 的情况下，复合光栅的反射率要高于矩形光栅。但在波长在 2.1 μm 和 2.5 μm 时，复合光栅出现了反差，反射率低于矩形光栅。在光通信波长为 1.55 μm 时，复合光栅(L2:L1 = 4:4)的反射率要更好，为光通信信息保护和防信息丢失方面提供了更好的波导选择。

值得注意的是，TE入射和锥形入射在短波的反射性能更好。反射率在 22%以上的波长范围可以控制在 1.47~2 μm 。而TM入射中，复合光栅的反射率更低，很显然，复合光栅的磁响应更强。

4.2. 反射率随光栅槽深度 d 的变化

图 6 给出了不同占空比下的复合光栅与矩形光栅在光栅槽深度 d 变化下的反射率。在 3.1 中选定数据的基础上，选定波长为 1 μm 。

图 6(a)是TM情况下复合光栅与矩形光栅计算时光栅槽深度 d 的变化和反射率之间的关系曲线。不同占空比的复合光栅和矩形光栅的反射率关系曲线趋于一致，没有明显的区别。在同一光栅槽深度 d 下，比

值为 $L2:L1 = 2:4$ 的复合光栅的反射率要略高于矩形光栅的反射率。

图 6(b)是 TE 情况下反射率随光栅槽深度 d 变化的变化关系图, 比值为 $L2:L1 = 2:4$ 的复合光栅反射率在光栅槽深度 $d = 0.5 \mu\text{m}$ 时收敛, 反射率基本保持在 78%。随着复合光栅($L2:L1 = 2:4$)光栅槽深度 d 的增大, 光栅的反射率的变化波动不大, 反射率一直保持在 0.75~0.8 之间。这种复合光栅($L2:L1 = 2:4$)的反射率与文献[13]提出的光栅反射率随波长变化一致, 不同之处在于光栅材料、光栅结构、光栅周期和电磁波入射角度等参数的调节, 且复合光栅($L2:L1 = 2:4$)的反射率更低, 透射率更高。

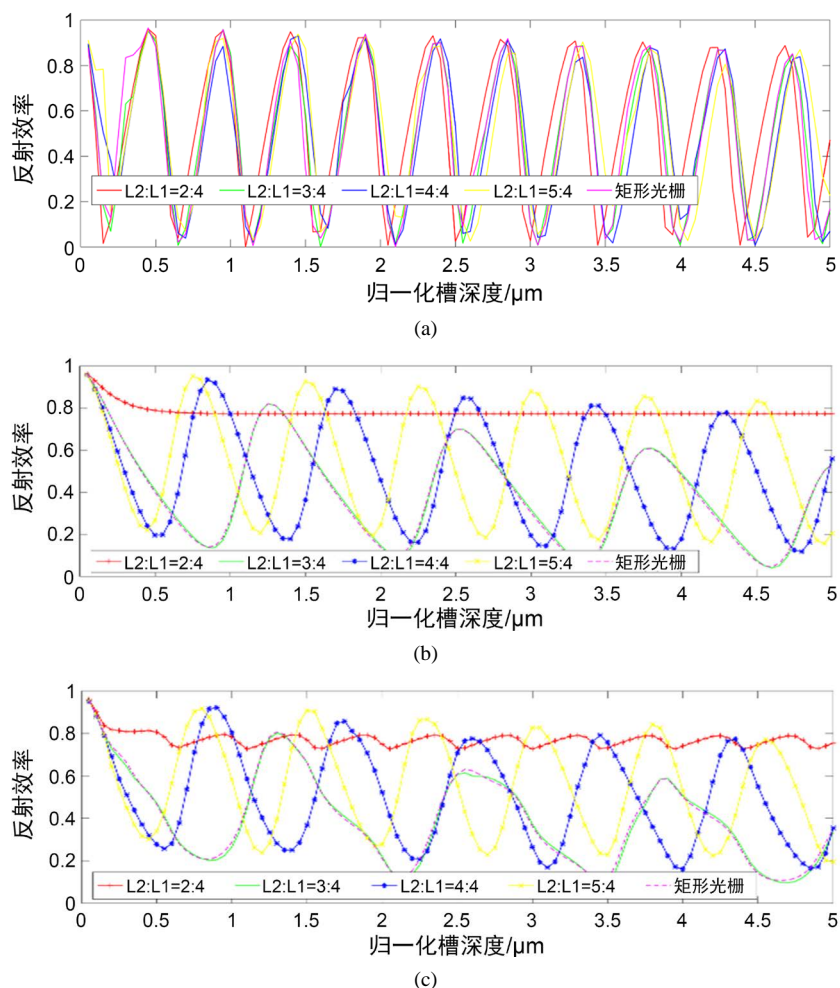


Figure 6. The variation of reflection efficiency with normalized groove depth
图 6. 反射率随光栅槽深度 d 的变化

作为对比, 图 6(c)表示的是锥形入射情况下各不同占空比的复合光栅与矩形光栅计算时光栅槽深度 d 的变化和反射率之间的关系曲线。比值为 $L2:L1 = 2:4$ 的复合光栅的反射率明显比矩形光栅和其他比例的复合光栅高, 可用作需求高反射率器件的光栅表面部分。比值为 $L2:L1 = 3:4$ 的复合光栅和矩形光栅关于反射率随着光栅槽深度 d 变化基本一致。图 6(a)中比值为 $L2:L1 = 4:4$ 和 $L2:L1 = 5:4$ 的复合光栅反射率近似于正弦模型, 二者之间有 $1/8$ “周期”的相位差, 在部分光栅槽深度 d 范围内, 高于矩形光栅的反射率。对于多变的波导器件, $L2:L1 = 4:4$ 和 $L2:L1 = 5:4$ 的复合光栅更能满足不同反射率需求的波导光栅。

图 6(a)、图 6(b)、图 6(c)中出现的吸收峰都比较尖锐, 这和文献[5] [6]中提到的相位共振的特征是一致的。可以清楚地看到, 相位共振时相邻凹槽相位相差 180° 左右。

4.3. 反射率随光栅周期的变化

图 7 给出了不同占空比下的复合光栅与矩形光栅在光栅周期变化下的反射率。在 3.1 中选定数据的基础上, 选定波长为 $1\ \mu\text{m}$ 。

图 7(a) 是 TM 入射情况下复合光栅与矩形光栅计算时光栅周期的变化和反射率之间的关系曲线。在光栅周期小于 $1.8\ \mu\text{m}$ 时, 比值为 $L2:L1 = 2:4$ 的复合光栅的反射率明显低于矩形光栅, 并且在光栅周期为 $1.7\ \mu\text{m}$ 时, 比值为 $L2:L1 = 3:4$ 和 $L2:L1 = 4:4$ 的复合光栅有极低的反射率。在光栅周期为 $3.5\ \mu\text{m}$ 到 $5\ \mu\text{m}$ 时, 不同比例的复合光栅与矩形光栅的反射率趋于一致。考虑到实际工艺耗材和成本的基础上, $L2:L1 = 4:4$ 的复合光栅要比矩形光栅效益更高, 可以满足更大范围的波导光栅反射率需求。

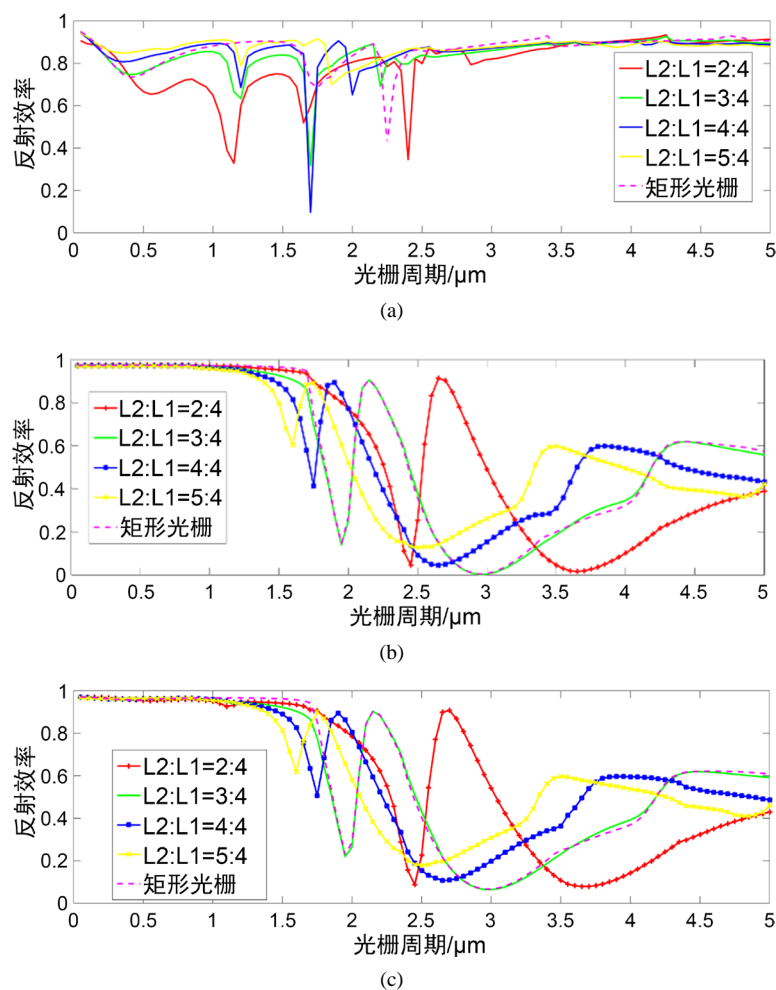


Figure 7. The variation of reflection efficiency with grating period

图 7. 反射率随光栅周期的变化

图 7(b) 是 TE 入射情况下反射率随光栅周期变化的变化关系图。图 7(b) 和图 7(a) 的反射率关系图趋于一致, 不同之处在于, 图 7(b) 中的四个谷值对比图 7(a) 更低, 峰值更高。

作为对比, 图 7(c) 是锥形入射情况下各不同占空比的复合光栅与矩形光栅计算时光栅周期的变化和反射率之间的关系曲线。在光栅周期是 $2\ \mu\text{m}$ 和 $3\ \mu\text{m}$ 时, 比值为 $L2:L1 = 3:4$ 的复合光栅和矩形光栅出现两个谷值(反射率极低), 在光栅周期是 $2.3\ \mu\text{m}$ 时, 出现峰值(反射率极高)。比值为 $L2:L1 = 2:4$ 的复合光栅

在光栅周期是 2.4 μm 和 3.6 μm 出现两个谷值, 在光栅周期是 2.7 μm 时, 出现峰值。考虑到实际工艺耗材和成本的基础上, $L_2:L_1 = 3:4$ 的复合光栅要比矩形光栅效益更高。

图 7(a) 中出现了比较尖锐的吸收峰, 这和文献 12 中提到的相位共振的特征是一样的。可以清楚地看到, 与图 6 的情况一样, 相位共振时相邻凹槽相位相差 180° 度左右。

5. 结论

利用严格耦合波理论方法, 模拟仿真了不同占空比的新型复合光栅与矩形光栅在不同波长、光栅槽深度 d 、光栅周期下的反射率。根据能量守恒定律, 在考虑介质损耗的情况下, 衍射效率和反射率之和趋近于 1。通过对不同占空比新型复合光栅进行反射特性数值分析, 选取了光栅材料 ($n_{II} = 0.22 - 6.71 * i$) 和入射条件, 为更大范围反射率和衍射效率需求的波导光栅设计和制作提供理论。考虑到实际工艺成本问题, 部分比值的复合光栅在不同入射条件下要比矩形光栅效果更佳。在今后的发展过程中, 不同占空比的复合光栅特性分析将成为解决波导光栅器件问题的主要研究方向, 为更多需求的波导光栅器件提供理论基础。

利用上述对一维复合光栅的研究, 可以更有效地设计优化光栅结构参数, 实现对不同区域的反射率的调控。在复合光栅中, 调控结构参数或波长可以将电磁场能量聚集在不同的亚波长凹槽中。

基金项目

上海交通大学人工结构及量子调控教育部重点实验室开放课题(课题编号: 2019-02)。

参考文献

- [1] Moharam, M.G., Grann, E.B., Pommet, D.A., *et al.* (1995) Formulation for Stable and Efficient Implementation of the Rigorous Coupled-Wave Analysis of Binary Gratings. *Journal of the Optical Society of America A*, **12**, 1068-1076. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.12.001068>
- [2] Moharam, M.G. (1988) Coupled-Wave Analysis of Two-Dimensional Dielectric Gratings. *Holographic Optics Design & Applications*, **883**, 8-11. <https://doi.org/10.1117/12.944119>
- [3] Moharam, M.G., Pommet, D.A., Grann, E.B., *et al.* (1995) Stable Implementation of the Rigorous Coupled-Wave Analysis for Surface-Relief Gratings: Enhanced Transmittance Matrix Approach. *Journal of the Optical Society of America A*, **12**, 1077-1086. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.12.001077>
- [4] 何俊发, 王红霞, 王君, 等. 复合光栅滤波在光学图像识别中的应用[J]. 陕西师范大学学报(自科版), 2004, 32(2): 50-51.
- [5] 傅正平, 林峰, 朱星. 一维金属光栅的光学反射吸收[J]. 物理学报, 2011, 60(11): 349-355.
- [6] Skigin, D.C. and Depine, R.A. (2005) Transmission Resonances of Metallic Compound Gratings with Subwavelength Slits. *Physical Review Letters*, **95**, Article ID: 217402.
- [7] 王东辉, 刘林, 郑普超, 等. 一种基于复合光栅的新型光位移传感器[C]//第三十二届中国控制会议, 2013: 7347-7350.
- [8] 尤勳, 黄战华, 蔡怀宇. 基于严格耦合波理论的新型耦合光栅分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2014(3): 262-266.
- [9] 杨亮, 李艳秋, 马旭, 等. 嵌入式光栅多层结构锥形衍射的严格耦合波理论研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(6): 1899-1904.
- [10] 孙小亮, 陈长虹, 孟德佳, 等. 复合金属光栅模式分离与高性能气体传感器应用[J]. 物理学报, 2015, 64(14): 147302.
- [11] Wu, J. (2016) Broadband Light Absorption by Tapered Metal-Dielectric Multilayered Grating Structures. *Optics Communications*, **365**, 93-98. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.12.006>
- [12] 艾康, 程骏骥, 朱坤峰, 等. 基于标准 CMOS 技术的新型多晶硅发光器件的设计与实现[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 701027.
- [13] 贾玉歆. 严格耦合波法模拟周期性材料的反射特性[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2016: 27-33.