

· 光电器件与材料 ·

亚波长双周期光栅电磁理论发展与现状

袁 博, 宁提纲, 许丽丽, 张 帆, 刘观辉

(北京交通大学光波技术研究所, 全光网与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

摘 要:通过对光栅电磁理论发展历史的回顾, 概述了一维衍射光栅电磁理论的发展历程与现状。通过一维光栅与双周期衍射光栅的结构参数的对比与实例的研究, 指出双周期衍射光栅在应用上比一维衍射光栅有更加优越的性能; 同时通过两种光栅编程仿真效果也表明: 双周期衍射光栅理论的发展还不成熟, 不能像一维光栅理论那样, 作为研究光栅特性及器件设计的理想工具。最后基于对多种双周期光栅电磁理论的研究对比, 总结了双周期光栅理论发展现状以及对以后的展望。

关键词:衍射光栅电磁理论; 双周期; 亚波长

中图分类号: TN383⁺.2

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2011)05-0024-04

Recent Advances and Situation of Electromagnetic Theory of Subwavelength Dual-period Gratings

YUAN Bo, NING Ting-gang, XU Li-li, ZHANG Fan, LIU Guan-hui

(Institute of Lightwave Technology, Key Laboratory of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Through the review of the history of the grating electromagnetic theory, the development process and present situation of electromagnetic theory of one-dimensional diffraction grating development are introduced. Comparing the parameters between one-dimensional gratings and dual-period diffraction grating and researching on the several examples, figuring out that in contrast to one-dimensional diffraction grating, the dual-period diffraction gratings has more excellent performance in application; And watching results of simulating of two kinds of grating show that the theory of dual-period diffraction grating development is not mature enough, which is not as the theory of one-dimensional grating, to apply on research of characteristics and design of grating as a ideal tool. Finally based on the comparison in varieties of electromagnetic theory of dual-period grating, present situation and the prospect of the theory development of double periodic grating are presented.

Key words: electromagnetic theory of diffractive gratings; dual-period; subwavelength

随着近代光学和光电子技术的迅速发展, 光电子仪器及其元件无论从形状上还是制作过程上都发生了巨大的改变。光学零件已经不仅仅是折射透镜、棱镜和反射镜这些简单的器件。像微透镜阵列、全息透镜、衍射元件和梯度折射率透镜等新型光学元件被越来越广泛地应用到各种光电子仪器中, 使得光电子仪器及元件更加小型化甚至趋于纳米级。

其中, 衍射光学元件用途相当广泛, 诸如元件相位匹配和偏振元件, 几乎在所有重大的领域中都有应用, 无论是国防领域还是有关民生的普通工业领域, 像光纤通信、信息处理、航空航天、激光技术和即将实现的全光网络, 亚波长级衍射光学元件都显示出越来越不可取代的作用和无限广阔的应用前景。亚波长双周期光栅因其灵活性和性能更是备受期待, 但

收稿日期: 2011-08-02

基金项目: 教育部博士点新教师基金(20100009120002)。

作者简介: 袁博(1986-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 硕士。主要研究方向为衍射光栅, 导模共振滤波器的研究。

分析双周期的电磁理论尚存在问题,还不能作为有效的分析工具。也因此,近几年其理论也被广泛地研究。

1 衍射光栅电磁理论的发展

亚波长双周期衍射光栅是指在 x 和 y 两个方向上周期性变化的衍射结构。目前,在光学领域已经确立了标量和电磁光栅两种用于分析周期性结构的主要理论。因为亚波长衍射光栅的尺寸过小甚至到纳米级,此时,标量理论已经得不出较准确的结果。分析亚波长衍射结构一般使用严格耦合波理论 RCWA (rigorous coupled wave analysis)。很多严格的数值方法被人们用来分析亚波长衍射光栅。其中包括:差分法^[1-2]、坐标变换法^[3]、傅里叶模型方法^[4]、瑞利法^[5]还有边界变换法^[6]等。而且经过了将近40~50年的发展,一维衍射光栅的电磁理论已经很成熟,很多优秀的方法可以用来分析结构很复杂的一维衍射光栅。由于,双周期衍射光栅的分析计算量很庞大,所以不能单纯地将用于一维光栅的理论扩展移植过来用于双周期光栅。针对双周期光栅的计算难题有很多有创意且有成效的算法被提出。

到21世纪初,光栅电磁理论的发展基本分为3个阶段。从19世纪60年代到19世纪70年代是第一个阶段,建立了光栅电磁理论的基础。此时分析光栅的2个最主要方法是积分法和差分法,这2种方法得到了充分的发展。这个阶段的主要成果被R. Petit总结发表在他编写的书里。第二个阶段的发展跨越了19世纪70年代到19世纪90年代初期这段时间。此阶段的特征是:大量新数值方法的涌现及它们在新领域里的应用(从无限到有限传导,入射角度从经典的垂直入射到锥形入射,各向同性到各向异性的光栅等)事实上,大多数现在存在的方法就是在这个阶段末期被提出的。很多到1992年之前的光栅方面重要的论文被D. Msystre整理编辑成册,收录在SPIE Milestone系列中。第三个发展阶段从19世纪90年代初至今。这时期的主要工作是对已存在方法的数值稳定性及收敛性进行改进,以应对光栅在实际应用中及有效的理论工具方面不断增长的需求^[7-9]。

以上的概括很清晰地描述了光栅理论的发展过程。随着人们对光电子设备性能的要求越来越高,而一维光栅结构因为限制在有限的平面中,所以能体现出来的特性很有限。因此衍射光学领域越来越

迫切的需要对多维的光栅器件进行设计开发。所以从19世纪90年代初,就有若干多维衍射光栅电磁理论成果被提出。不过,大多数的理论都只是基于将原有的一维光栅电磁理论方法进行简单的扩展,利用这些方法编出的仿真程序要么极其耗费时间,要么因为收敛性不够而得不到理想的结果。到今天,越来越多的注意力被放到了多维衍射光栅器件的电磁理论分析上,已经有些很有创建性的双周期衍射光栅理论被提出。如果承接上一段的说法,这可以说是光栅的电磁理论发展的第四阶段的开始;从光栅的分类上也可以说,现在进入了多维衍射光栅发展的时代。

2 双周期光栅与一维光栅对比分析

由于多维衍射光栅拥有更多的优化参数及衍射图样,而且多维光栅的极限情况下就可以形成一维衍射光栅,所以多维光栅一定会有更优于一维光栅的特性。如,在设计滤波器方面,参考文献[8]中利用亚波长光栅的Conical Mounting入射角结构设计了一款非偏振导模共振滤波器,此滤波器在多个偏振角及入射角实现了效果较理想的非偏振效果。通过文献[9]和文献[10]了解到利用一维衍射光栅设计非偏振导模共振滤波器是非常困难的,即使勉强设计出来效果也较差,不但线宽效果不佳(TE偏振与TM偏振线宽相差较大)而且结构参数不利于实际制作。利用的Conical Mounting结构仅仅比一维衍射光栅多了一个参数——入射角度的方位角 ϕ 。考虑到双周期结构更加多样的参数体系,有理由对它充满期待,如表1所示,为一维与双周期结构对照表。

表1 一维与双周期结构对照表

	双周期	一维
	n_c, n_s, h, λ	n_c, n_s, h, λ
全局优化变量	f_x, f_y, A_x, A_y	f, A
	$n_{x_h}, n_{x_l}, n_{y_h}, n_{y_l}$	n_h, n_l
	θ, φ, ψ	θ
数值计算时矩阵维度	4	2
可设计衍射图案	无限多任意图形	有限的平面图形
入射角平面	任意平面	唯一平面

如表1所示,首先看可优化参数,其中, n_c, n_s, h, λ 为覆盖层基底的折射率; h 为光栅厚度; λ

为入射波长, f 为填充因子, Δ 为调制周期, 全局优化变量的第三行为调制区折射率, θ, φ, ψ 分别为入射角、方位角和偏振角。双周期光栅有 15 个全局优化参数而一维光栅只有 9 个; 且双周期结构的衍射图样是无限多的任意平面(只要能想到的平面)。相对于一维光栅, 双周期光栅的结构灵活性显而易见, 这就表明, 双周期结构能够设计出特性更好的光器件。还以非偏振导模共振滤波器为例, 在文献[11,12]中以双周期结构设计出了多种非偏振导模共振滤波器而且结构参数有利于实际制造。

3 双周期光栅电磁理论现状

3.1 一维光栅与双周期光栅理论对比

到目前为止, 很多理论方法已经被应用分析双周期光栅。但是, 这些方法都面临同一个问题——运行环境内存的饱和及时间消耗过多。通过一个简单的估计对比就可以显示出编程计算双周期衍射光栅有多困难。比如, 通常光栅的衍射效率是人们比较感兴趣的, 下面就通过计算一个亚波长衍射光栅零级衍射效率所耗时间来举例说明。

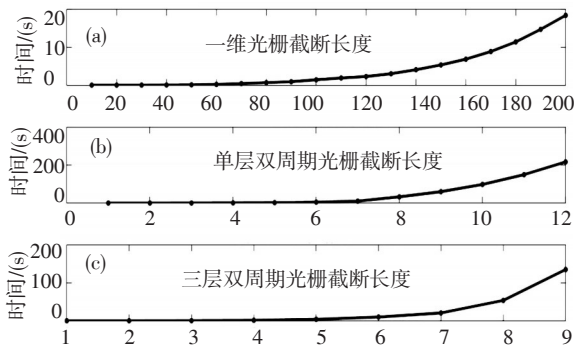


图1 程序耗时对比

如图 1a~图 1c 三幅图分别表示的是一维光栅、单层双周期光栅和三层双周期光栅计算时的截断长度和零级衍射效率之间的关系曲线。当计算一维衍射光栅时, 一般使用 200 以上的截断长度, 这样才能得出较准确的数据, 当使用 200 为截断长度时计算一个结构的零级衍射效率耗时大概 20 s; 而对于图 1b 中显示的, 计算一个单层双周期光栅结构零级衍射效率时, 虽然截断长度只能保留到 12 左右(如果想得到较准确的数据截断长度也应该尽量得高, 但再大的截断长度一般的计算机就不能胜任), 但耗时已经达到 200 多秒; 如果增加衍射结构的层数如图 1c 所示, 耗时更是达到了惊人的长(此时截断长度只能保留

9, 耗时多余单层结构保留 9 个截断长度时的耗时)。且对于双周期光栅以上曲线会越来越往后越陡峭, 计算时间大幅度增加。按照这样的时间比例粗略地估算, 利用遗传算法等全局优化算法对优化一个双周期光栅的耗时将达到 100 多天, 而且由于截断长度不够, 也得不到准确的值。这样的性能是不能应用的。

上面提到过, 多维光栅的极限情况下可以视为一维光栅。下面就分别使用一维光栅与双周期光栅编程仿真同一维光栅结构进行对比。

图 2 为利用一维光栅程序保留 200 截断长度的反射谱, 图 3 为双周期结构保留截断长度 10 时的反射谱。明显的, 虽然仿真的是同一结构但是反射谱已经发生了偏移, 而且保留这么少的截断长度是得

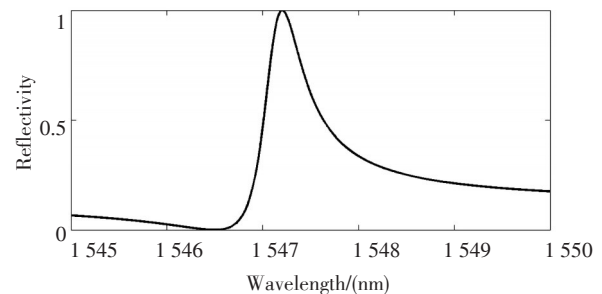


图2 一维光栅反射谱

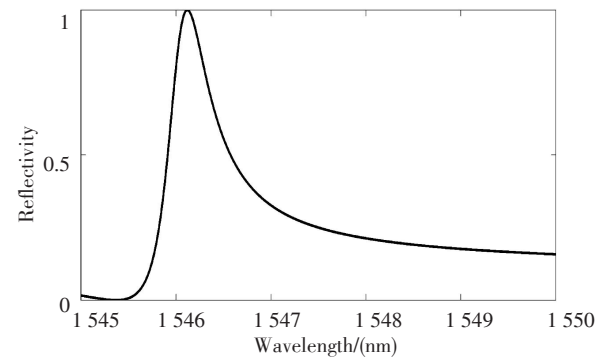


图3 双周期光栅反射谱

不到较准确的结果的。但如果保留足够的截断长度, 那么所需要的内存和耗费的时间是惊人的, 是目前任何普通的台式电脑所不能承担的。

3.2 理论分析

利用严格耦合波理论解光栅问题的基本步骤:

(1) 假设入射区的场为假周期解并代入麦克斯韦方程, 描述出入射区与反射区解的形式;

(2) 在调制区内, 利用傅里叶模型将数理方程展开变形为本征方程的形式。并解此本征方程。解得

的本征值即代表此调制区的场特征和幅值;

(3)在入射边界与透射边界处利用边界条件联立方程组,解方程组得到系数;

(4)将步骤(3)中得到的系数代入入射区与反射区方程得到最终结果。

以上是解一维光栅的基本步骤,解双周期光栅基本步骤基本相同,只是在解本征值处,为表示多维空间的解要利用更多维度的矩阵;还有在利用边界条件联立方程组时得到更加庞大的矩阵。

就一维与一维光栅解法有微小的不同导致目前的双周期光栅理论不能作为理想的分析工具。双周期光栅结构理论之所以出现以上问题的原因有两点:利用数值方法进行计算时会产生极庞大的矩阵;计算过程中出现计算工具无法计算的大指数函数。以文献[4]中提供的本征值解法为例,上节中计算程序都是基于这篇文献编写。

$$E_x(x, y, z) = \sum_{l=1}^{2L_z} \{A_l \exp(i\gamma_l z) + B_l \exp[-i\gamma_l(z-h)]\} \times \sum_{m,n} E_{xnm} \exp[i(\alpha_m x + \beta_n y)] \quad (1)$$

$$E_y(x, y, z) = \sum_{l=1}^{2L_z} \{A_l \exp(i\gamma_l z) + B_l \exp[-i\gamma_l(z-h)]\} \times \sum_{m,n} E_{ymn} \exp[i(\alpha_m x + \beta_n y)] \quad (2)$$

$$H_x(x, y, z) = k \sum_{l=1}^{2L_z} \{A_l \exp(i\gamma_l z) - B_l \exp[-i\gamma_l(z-h)]\} \times \sum_{m,n} H_{xnm} \exp[i(\alpha_m x + \beta_n y)] \quad (3)$$

$$H_y(x, y, z) = k \sum_{l=1}^{2L_z} \{A_l \exp(i\gamma_l z) - B_l \exp[-i\gamma_l(z-h)]\} \times \sum_{m,n} H_{ymn} \exp[i(\alpha_m x + \beta_n y)] \quad (4)$$

以上是调制区即光栅区场的表示形式,可以看到每个式子中都含有指数函数,计算时由于指数函数中的变量过大或过小而导致计算工具的精度不够。

再看以下利用边界条件得到的方程组

$$u_x \delta_{m0} \delta_{n0} + R_{xnm} = \sum_l [A_l + B_l \exp(i\gamma_l h)] E_{xnm} \quad (5)$$

$$u_y \delta_{m0} \delta_{n0} + R_{ymn} = \sum_l [A_l + B_l \exp(i\gamma_l h)] E_{ymn} \quad (6)$$

$$(\beta_0 u_z - r_{00} u_y) \delta_{m0} \delta_{n0} + \beta_n R_{znm} + r_{nm} R_{ymn} = k \sum_l [A_l - B_l \exp(i\gamma_l h)] H_{xnm} \quad (7)$$

$$(r_{00} u_x - \alpha_0 u_z) \delta_{m0} \delta_{n0} - \alpha_m R_{zmn} - r_{mm} R_{xmn} = k \sum_l [A_l - B_l \exp(i\gamma_l h)] H_{ymn} \quad (8)$$

$$\sum_l [A_l \exp(i\gamma_l h) + B_l] E_{xnm} = T_{xnm} \quad (9)$$

$$\sum_l [A_l \exp(i\gamma_l h) + B_l] E_{ymn} = T_{ymn} \quad (10)$$

$$k \sum_l [A_l \exp(i\gamma_l h) - B_l] H_{xnm} = \beta_n T_{znm} - t_{nm} T_{ymn} \quad (11)$$

$$k \sum_l [A_l \exp(i\gamma_l h) - B_l] H_{ymn} = t_{nm} T_{xnm} - \alpha_m T_{zmn} \quad (12)$$

由于要解以上联立的方程组,过程中需要用到矩阵工具产生庞大的矩阵从而带来了时间上的耗费。

近20年来,为了解决以上双周期光栅理论在应用中存在的问题,不断有新的尝试被应用。Li利用非直角的笛卡尔坐标变换使得有此非直角衍射图案的双周期结构的计算效率有很大的提高^[13];Bai将群理论应用于光栅结构的分析对多种对称结构进行分析,利用不同情况不同对待做出了新的尝试^[14-16];最近又有利用法向量的严格耦合波方法解决光栅问题的方法被提出^[17,18]。双周期衍射光栅的电磁理论正在完善与发展。尽管在耗时和收敛性上都得到了极大的改进,但是以上的成果还不足以用做分析双周期光栅的理想工具。双周期衍射光栅的电磁理论还需要进一步的发展。

4 结论

文中对一维衍射光栅电磁理论的发展进行了回顾。对双周期光栅电磁理论的现状进行了研究,并通过对比与仿真数据指出其现今存在的问题。比照一维光栅电磁理论发展的足迹,对双周期光栅理论的发展进行了展望。如今,随着人们的需求光电子行业面临高速发展,而其中的瓶颈问题急需解决。双周期光栅的仿真设计需要理论支持,在今后的发展过程中,双周期光栅及更多维度的衍射器件的理论问题的解决和发展将为光电领域带来巨大的变化。

参考文献

- [1] P Vincent. A finite-difference method for dielectric and conducting crossed gratings [J]. Optics Communications, 1978, 26(3):293-296.
- [2] Soon Ting Han, Yuh-Luen Tsao, RODGER M Walsler, et al. (下转第71页)

对获得的测量值进行数字滤波处理,即进行多次测量后取平均值。经过硬件、软件滤波处理后的系统误差有 ± 1 LSB。

3 程序设计

使用C语言编写 AT89C51 单片机程序,使得程序移植和调用方便、灵活,在程序发生错误的时候,可以很快找到并改正,能最大限度地提高系统程序的可靠性和稳定性,程序流程图如图4所示。

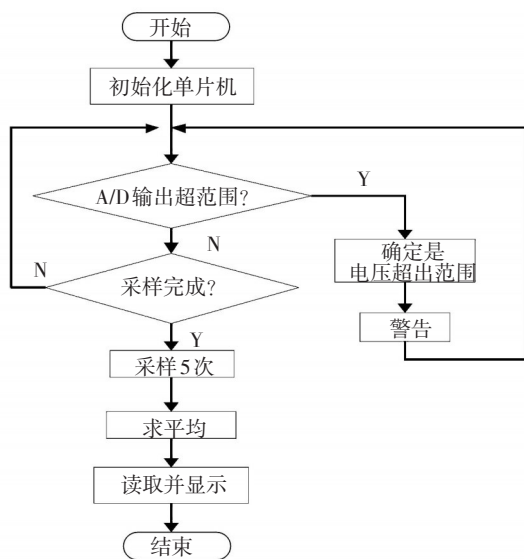


图4 程序流程图

为了保证数据采集和传输的正确性,如果单片机的晶振选择不当,则可能造成单片机不能正常工作。开始运行时,需要对系统进行初始化,由于单片机接收到的是数字信号,先检测 A/D 输出是否超出范围,当系统正常采样时,采样几次完成后,进行平均值的求取,由单片机处理并完成显示。

4 结论

采用的微电流源芯片 LT3092 输出的恒流装置

和采用的高性能 ICL7650 和 OP07ADJ 构成测量放大电路,实现测量了低测试电流的微电阻测量,在测量范围 $0.5\sim 0.05\ \Omega$, 测量电流为 $5\sim 10\ \text{mA}$ 时,测量精度可达 $1/1\ 000$ 。同时,采用微处理器进行控制,可实时在线显示所测量电阻值,并实时进行自校准处理,进一步地提高测量的准确性,实现了智能化的测量,但是,系统测量范围存在一定的局限性,有待于进一步的深入研究。

参考文献

- [1] 刘振来,李成虎.利用恒流源测低电阻[J].河西学院学报,2005,21(5):35-36.
- [2] 吴文全. $\mu\Omega$ 小电阻测量方法研究[J].电测与仪表,2003,11(9):26-28.
- [3] 史翔,张岳涛.基于 AT89C51 单片机微电阻测量系统[J].甘肃科技,2007,23(7):31-32
- [4] 李建新.基于恒流源的电阻测量[J].现代电子技术,2004,19(9):89-90.
- [5] 赵少波.毫欧姆级电阻测量电路设计[J].仪器仪表学报,2001,22(8):137-138.
- [6] 吕泉.低电阻测量方法分析[J].贵州教育学院学报(自然科学),2005,16(4):30-32.
- [7] 江小安,孙肖子.模拟电子技术[M].西安:西北工业大学出版社,2008:127-139.
- [8] 张永瑞,杨林耀.电路分析基础[M].西安:西安电子科技大学出版社,1995,2(5):10-38.
- [9] 郭天祥.新概念51单片机C语言教程书[M].北京:电子工业出版社,2008,1(3):147-177.
- [10] 翟玉文,艾学忠,杨潇,等.实用恒流源电路设计[J].电子测量技术,2002,4(3):25-40.
- [11] 陈炯,王永红,魏新劳.新型电缆导体直流电阻测量仪器的研制[J].电线与电缆,2002,1(2):40-42.
- [12] 顾洪涛,仇延生.恒流电位降法低值电阻精密测量及其应用[J].电测与仪表,1998,35(7):17-19.
- [13] 穆云田.基于单片机控制的直流恒流源的设计[J].2007,1(12):15-19.

(上接第27页)

Electromagnetic scattering of two-dimensional surface-relief dielectric gratings [J]. Applied Optics, 1992,31(13): 2343-2352.

- [3] J B Harris, T W Preist, J R Sambles, et al. Optical response of bigratings[J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1996, 13(10):2041-2049.

- [4] Eero Noponen, Jari Turunen. Eigenmode method for electromagnetic synthesis of diffractive elements with three-dimensional profiles[J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1994, 11(9):2494-2502.
- [5] Jean-Jacques Greffet, C Baylard, P Versaevel. Diffraction of electromagnetic waves by crossed gratings: a series solution [J]. Optics Letters, 1992, 17(24): 1740-1742.(下转第80页)