

文章编号: 0258-7025(2003)Supplement-0035-04

亚波长周期结构光栅的制作工艺和理论关系研究

曹召良¹, 卢振武¹, 李凤有¹, 孙强²

(¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130022

²南开大学现代光学研究所光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要 利用严格耦合波理论(RCWA)从两方面研究了亚波长周期结构光栅的理论计算结果和制作工艺的关系:一是理论设计光栅时,理论结果和制作工艺的最佳结合问题;二是制作具有一定应用要求的光栅时,应用要求、理论和制作工艺的最佳结合来选择光栅的参数的问题。

关键词 制作工艺; 占空比; 光栅周期; 刻蚀深度; 最佳结合点

中图分类号 TH741.6

文献标识码 A

Investigation of the Relation between Theory and Fabrication for Subwavelength Periodic Gratings

CAO Zhao-liang¹, Lu Zhen-wu¹, LI Feng-you¹, SUN Qiang²

(¹State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

The Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130022 China

²The Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071 China)

Abstract The rigorous coupled wave analysis (RCWA) was used in the paper to investigate the relation between the theoretical results and fabrication for subwavelength periodic gratings: The investigation includes how to choose the best combination of theoretical results and fabrication technique for designing gratings and when fabricating the gratings for special application, how to select the parameter of the gratings so that the requirement of application, theory and fabrication were best combined.

Key words fabrication technique; filling factor; period of the grating; etching depth; best combined point

1 引言

在众多的二元光学元件中,亚波长周期结构光栅以其高透射、消偏振^[1]等特性为人们所关注,关于其矢量衍射特性分析^[1-3]和制作^[4]也有文献报道。但都没有对其理论结果和制作工艺如何进行有机的结合进行分析。由于亚波长周期结构光栅的周期小于一个波长,其在可见光区的周期在纳米量级,在红外区的周期在微米量级。因此,它的制作工艺需要利用大规模集成电路的制作工艺,且制作比较困难。这样,如何把理论和制作工艺有机地进行结合以选择最佳的光栅结构参数便成了急需解决的问

题。本文针对这一问题进行了分析。

2 理论设计光栅和工艺关系研究

本文以抗反射光栅为例,关于理论和工艺关系研究采用文献[1]的光栅面形(如图1);理论计算采用严格耦合波理论。若无特别说明均以下列参数为例: $T_x=T_y=0.1\lambda$, $L_x=L_y=0.7T_x$, $\lambda=1.533\ \mu\text{m}$, $h=0.2\lambda$, $n_1=1, n_3=1.5$ 。

2.1 光栅周期和制作工艺的关系

制作光栅时需进行刻划,以制成模板,或直写成光栅。据了解,目前国内的最高刻划水平在 $1\ \mu\text{m}$

基金项目: 国家自然科学基金(6007806)、应用光学国家重点实验室基金资助课题。

作者简介: 曹召良(1974.6-),男,河南省济源市人,硕士,主要从事衍射光学元件的理论分析、算法研究、设计和离子束刻蚀制作。E-mail:caozlok@yahoo.com.cn

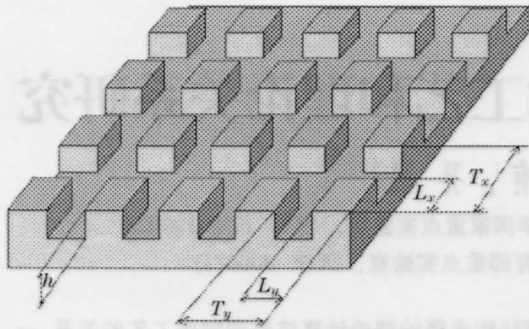


图1 二维表面浮雕结构图

Fig.1 Geometry of two dimensional surface-relief structure

左右,且此时刻划出的面形质量不高。由于受当前刻划加工工艺的限制,这就需要如何合理地选择光栅周期,以使在现有的工艺条件下能制作出亚波长周期结构光栅。

图2为周期为 $0.1\lambda, 0.2\lambda, \dots, 0.9\lambda$ 时反射率随刻蚀深度的变化规律。由图可看出在 $h=0.2\lambda$ 附近,随周期的增大具有最小反射率值的刻蚀深度有增大趋势,且在周期取不同值时反射率都有最小值点。图3为反射率随光栅周期、刻蚀深度 h 的变化规律,在 $h=0.2\lambda$ 附近,反射率取最小值时,计算结果显示:1)周期可取不同值;2)当周期 $T < 0.67\lambda$ 时,其所需的最小刻蚀深度几乎不变,刻蚀深度为 $h=0.20\lambda$;周期 $T > 0.67\lambda$ 时,其所需的最小刻蚀深度增大。由计算结果可看出,在 $T=0.1\lambda$ 和 $T=0.9\lambda$ 时,光栅都具有良好的高透射特性。但制作周期为 0.1λ 的亚波长周期结构光栅比制作周期为 0.9λ 的光栅的难度大大增加,且费用昂贵,有的根本就制作不出来。因此,在制作时以选周期为 0.9λ 为好,此时周期较大便于制作。但同时光栅周期的变化影响着刻蚀深度,而

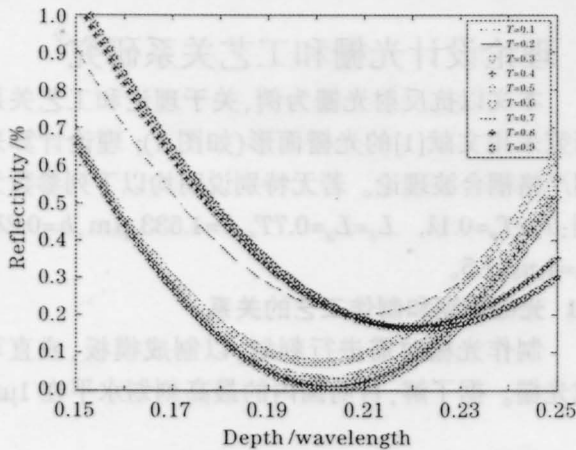


图2 在 $h=0.2\lambda$ 附近反射率随刻蚀深度的变化关系

Fig.2 The relation between reflectivity and groove depth near $h=0.2\lambda$

刻蚀深度同样和制作工艺有关;这样,光栅周期的选择便和刻蚀深度的选择有关。如何进行刻蚀深度的选择便是下边将要讨论的问题。

2.2 刻蚀深度对制作工艺的影响

下面以离子束刻蚀为例,来研究制作工艺和刻蚀深度的关系;这一步的关键是在保持光栅的面形几乎不变的情况下,刻到要求的刻蚀深度。在刻光栅的过程中,有一个深宽比的问题^[4]:即刻蚀的面形与沟槽的宽度 L 和沟槽的深度 h 的比值 h/L 有密切的关系。由于有刻蚀二次效应的存在,在一定的宽度下,衬底上刻蚀出的沟槽轮廓为“V”形,其刻蚀的深度有一个极限值。因此,既保持其面形不变又要刻出大的深度是非常困难的;尤其是在光栅的周期非常小的时候,能刻蚀出的最大刻蚀深度也相应地变小,在极限刻蚀深度范围内,当刻蚀深度较大时光栅面形极差。这就要求在制作光栅时应考虑如何选择小的刻蚀深度。

图4为图3的另一侧面图,由图可看出其有两个反射率最小值点,分别对应两个 h 值: $h=0.2\lambda, h=$

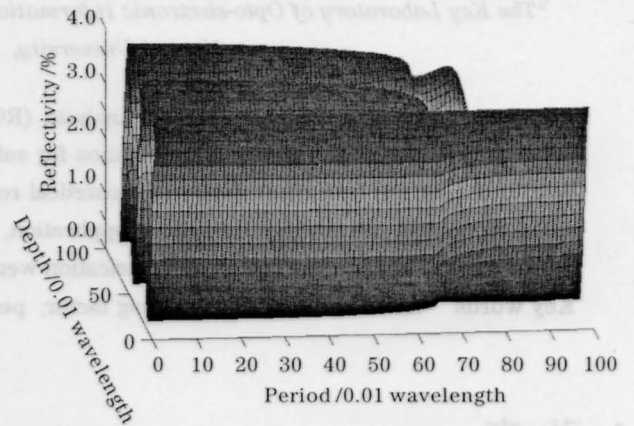


图3 $f=0.49$ 时反射率随周期、刻蚀深度的变化规律

Fig.3 The reflectivity as a function of depth and period, here $f=0.49$

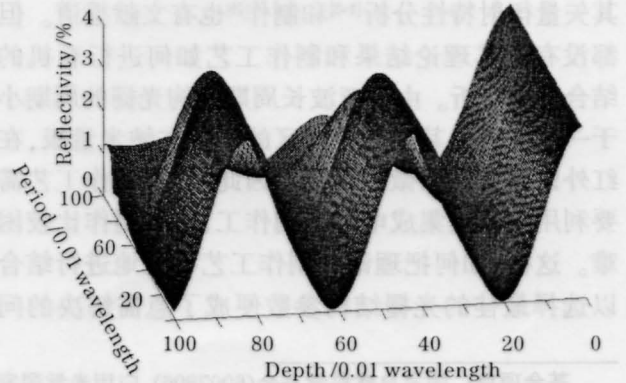


图4 图3的另一侧面图

Fig.4 The other hand of Fig.3

0.61λ 。从理论上讲,其光栅都具有高透射特性。但从制作角度考虑,最好取 $h=0.2\lambda$; 这时刻蚀深度较小,便于保持光栅的面形,加工出高质量的光栅。由 2.1 的分析知:周期大于 0.67λ 时,其所需的最小刻蚀深度明显增大,因此最好选择周期 $T=0.67\lambda$, 此时周期较大且刻蚀深度小。因此,从选择最小刻蚀深度的角度来考虑,由于周期对刻蚀深度的影响使得周期的选择不能过大。

2.3 制作工艺对占空比的影响

如图 1,光栅的占空比 $f=(L_x \times L_y)/(T_x \times T_y)$ 。占空比也在两方面影响着光栅参数的选择:1) 对一定的周期,由于受刻划水平的限制,占空比太大和太小都不利于制作光栅模板,这和为什么选择大周期结构是同样的道理;2) 在周期一定时,占空比同样也影响着刻蚀深度:占空比 f 较大时,沟槽宽度变小,能刻蚀的最大刻蚀深度也减小,刻不出大的深度;占空比 f 较小时,沟槽宽度变大,能刻出大的深度,但给制作模板增加了难度。从以上分析来看,最合适

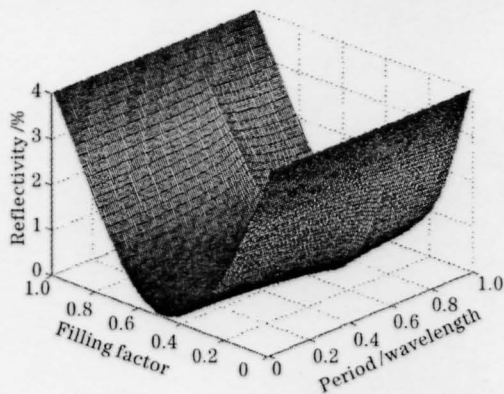


图 5 $h=0.2\lambda$ 是反射率随周期、占空比的变化规律

Fig.5 The reflectivity as a function of period and filling factor, here $h=0.2\lambda$

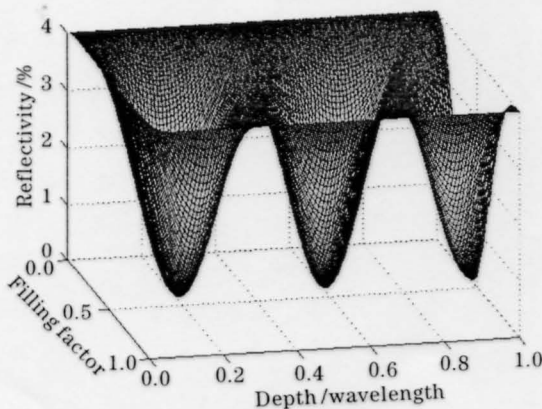


图 6 $T=0.67\lambda$ 时反射率随占空比、刻蚀深度的变化规律

Fig.6 The reflectivity as a function of filling factor and depth, here $T=0.67\lambda$

的占空比应为 0.25。但在选择合适占空比的同时还应该保持光栅的特性。因此,应该在保持光栅特性基础上尽量让占空比 f 靠近 0.25。

图 5 为反射率随占空比和周期的变化关系,由图可看出:1) 占空比的取值在 0.36 和 0.64 之间时反射率有最小值;2) 随着周期的增大占空比先减小后增大;实际计算结果为:在反射率取最小值时,周期 $T=0.67\lambda$, 占空比有最小值 $f=0.38$ 。即在 $h=0.2\lambda$ 时,周期和占空比的最佳结合点为: $T=0.67\lambda, f=0.38$ 。

图 6 为周期 $T=0.67\lambda$ 时反射率随刻蚀深度、占空比的变化关系;由图知有两个点对应于反射率取最小值;实际计算结果为:当周期 $T=0.67\lambda$ 时, $f=0.38, h=0.21\lambda, R=0.00084\%$ 。综合考虑 T, h, f 三者与反射率之间的关系,取 $f=0.38, h=0.21\lambda, T=0.67\lambda$ 为好;此时所取的 f, h, T 值都比较便于制作光栅,且能达到非常小的反射率。

2.4 周期、占空比和刻蚀深度的最佳结合问题

由上可知:1) 周期、刻蚀深度和占空比三者的取值原则是:周期的取值应尽量地大,刻蚀深度的取值应尽量地小,占空比的取值应尽量靠近 $f=0.25$;2) 周期、刻蚀深度和占空比三者之间相互影响;因此,在寻找最佳结合点时,在保持光栅的某种特性下,应先固定其中一个参数的值,以其他两个参数的取值原则找出这两个参数的最佳结合点;再在最佳结合点处选择这两个参数中其中一个参数的量值,以其为定值,再寻找剩余两个参数的最佳结合点;经过这样的反复循环,便可找出三个参数的最佳结合点。

3 应用要求与制作工艺的关系

在实际使用光栅时,要求制作的光栅指标一般都低于理论计算值;这时就需要考虑如何根据具体的要求结合现有的工艺水平来最佳地选择光栅的参数,以制作出满足要求的光栅。下面以文献[1]的光栅结构和减反特性为例来分析应用要求与制作工艺的关系。由文献[1]知,理论上这种结构的光栅可实现零反射特性;若在实际应用时要求透射率达到 98%,则可以以 $R=2\%$ 为基准来选择光栅的参数,若选光栅的周期 $T=0.67\lambda$, 则可选择 $h=0.12\lambda, f=0.25$, 此时其反射率 $R=1.9447\%$, 满足应用要求;这和 2.3 中的理论最佳结合点: $T=0.67\lambda, h=0.21\lambda, f=0.38$ 的光栅参数相比,设计出的光栅要容易制作得多。因此,在制作有一定应用要求的光栅时,若以应用要求为基准来确定光栅的结构参数,则这三个参数

的优化空间大,便于工艺加工。

4 结 论

通过分析发现:1) 在制作有一定特性的光栅时,光栅参数的选择原则:周期的取值应尽量地大,刻蚀深度的取值应尽量地小,占空比的取值应尽量靠近 $f=0.25$;2) 以参数的选择原则结合理论计算结果来最优化地选择光栅的参数,以使选定参数的光栅能够制作出来或能较容易地制作;3) 在制作有具体应用要求的光栅的时候,应以应用要求为基准,结合理论计算结果来找出并优化光栅的参数。这些结果对制作其他周期结构光栅也同样适用。

参 考 文 献

- 1 鱼卫星,卢振武,王 鹏 等. 二维表面浮雕结构的矢量衍射分析[J]. 光学学报, 2001, 21(8): 980~986
- 2 Ralf Bräuer, Olof Braungdahl. Electromagnetic diffraction analysis of two-dimensional gratings [J]. *Opt. Comm.*, 1993, 100:1~5
- 3 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
- 4 S. J. Walker, J. Jahns L. Li *et al.*. Design and fabrication of high-efficiency beam splitters and beam deflectors for integrated planar micro-optic systems [J]. *Appl. Opt.*, 1993, 32(14):2494~2501
- 5 刘金声. 离子束技术及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 1995. 197~200



图 5 $\lambda=0.6328 \mu\text{m}$ 激光半圆占空比时反射率随周期和填充因子的变化规律
 Fig. 5 The reflectivity as a function of period and filling factor, laser wave $\lambda=0.6328 \mu\text{m}$

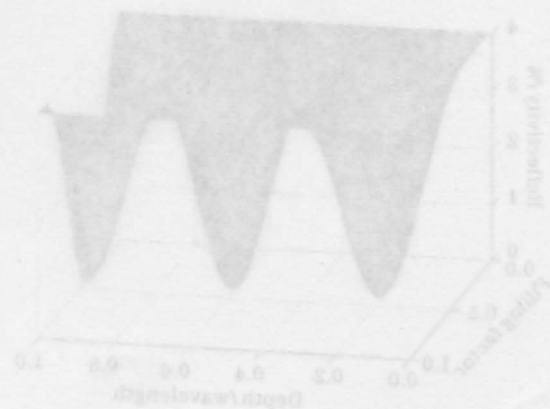


图 6 $\lambda=0.6328 \mu\text{m}$ 激光半圆占空比时反射率随周期和填充因子的变化规律
 Fig. 6 The reflectivity as a function of filling factor and depth, laser wave $\lambda=0.6328 \mu\text{m}$