

# 基于二维亚波长光栅的偏振不敏感宽光谱高反镜的设计

周顾人, 段晓峰, 黄永清, 刘凯, 任晓敏

北京邮电大学信息光子学与光通信研究院信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876

**摘要** 提出了一种基于块状亚波长光栅的偏振不敏感宽光谱高反镜的设计方法。亚波长光栅的反射性能由光栅的结构参数即周期和占空比决定, 优化周期和占空比值将使亚波长光栅在更宽的光谱范围内具有更高的反射率。采用严格耦合波分析法计算不同周期下光栅的反射率, 再构造一个集合包含所有反射率超过 99% 的光栅周期值, 运用迭代优化算法, 减小集合的数据规模, 从而快速确定最优的光栅周期值和它对应的占空比值。仿真结果显示, 使用标准的绝缘体上硅(SOI)晶片制作的二维块状亚波长光栅反射镜将在 182 nm 的光谱范围内保持超过 99% 的反射率, 同时光栅的反射特性与垂直入射光的偏振态无关, 但是当入射角大于  $7^\circ$  时在 1439~1621 nm 的波长范围内光栅的反射率将无法始终保持在 99% 以上。因此, 可以将二维块状亚波长光栅应用在垂直腔面激光器上, 用于激光多普勒测速或者构建光缓存的二维网络。最后, 通过数值仿真证实, 在二维块状亚波长光栅反射镜的制作过程中, 允许周期值和占空比值存在一定的误差。

**关键词** 光学器件; 亚波长光栅; 迭代优化算法; 反射镜

**中图分类号** O436      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.032301

## Design of Polarization-Insensitive Broadband Spectrum High-Reflectivity Mirror Based on 2D Subwavelength Grating

Zhou Guren, Duan Xiaofeng, Huang Yongqing, Liu Kai, Ren Xiaomin

State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Institute of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

**Abstract** An approach of designing polarization-insensitive, broadband spectrum, high-reflectivity mirror based on blocky structure with subwavelength grating is proposed. The reflectance properties of subwavelength grating are determined by structure parameters of grating such as period and duty cycle. Optimizing the period and duty cycle can get a higher reflectivity at broader spectrum. The reflectivities of grating with different periods are calculated by rigorous coupled wave analysis. A set is formed with grating periods of reflectivities over 99%. The size of data set is reduced using an iterative optimization algorithm, which can quickly determine the optimal grating period and the corresponding duty cycle. The simulation results show that two-dimension blocky structure with subwavelength grating mirror fabricated with standard silicon-on-insulator (SOI) wafer can keep the reflectivity over 99% at a spectrum range of 182 nm. Meanwhile the reflectance properties of grating is independent of polarization of vertical incident light. But it can't keep the reflectivity over 99% at a wavelength range from 1439 nm to 1621 nm anymore as the incident angle up to  $7^\circ$ . So the can be applied on vertical cavity surface emitting lasers (VCSEL) to achieve velocity measurement of laser Doppler or two-dimension network structure of optical buffer. Furthermore, numerical simulations show that the working process of two-dimension blocky structure with subwavelength grating

**收稿日期:** 2016-07-15; **收到修改稿日期:** 2016-10-24

**基金项目:** 国家自然科学基金(61274044, 61574019, 61020106007)、北京市自然科学基金(41274044)、高等学校学科创新引智计划(B07005)

**作者简介:** 周顾人(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事光电子器件方面的研究。E-mail: georgia.good@bupt.edu.cn

**导师简介:** 段晓峰(1976—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光电子器件方面的研究。

E-mail: xfduan@bupt.edu.cn(通信联系人)

mirror has some tolerance of period and duty cycle.

**Key words** optical devices; subwavelength grating; iterative optimization algorithm; reflecting mirror

**OCIS codes** 230.0250; 250.7260; 050.6624

## 1 引言

亚波长光栅(SWG)是一种周期性的、尺寸接近或小于入射光波长、反射和透射的光波中只存在零级衍射波、高阶衍射波都为倏逝波的特殊光栅<sup>[1-5]</sup>。在亚波长光栅中有一种特殊的光栅类型被称为高折射率差亚波长光栅(HCG)<sup>[6]</sup>。HCG的光栅层与周围介质之间具有较大的折射率差,在宽光谱范围内具有极高的反射率<sup>[7-8]</sup>,近年来,已有研究者将它应用在垂直腔面发射激光器(VCSEL)和反射增强型光探测器中<sup>[2,9-10]</sup>。制作HCG反射镜通常使用绝缘体上硅(SOI)晶片,通过在晶片的顶层硅上加工出特定的亚波长光栅结构,就可以将SOI晶片制成方便与III-V族半导体材料直接键合的反射镜。在新型光电器件中,可以使用这种体积小、易集成的HCG反射镜来代替传统的分布式布拉格反射镜(DBR)。替代后的新器件体积更紧凑、加工工艺更简单、价格更便宜、性能更优良。

HCG的特殊衍射特性是由它的结构参数决定的。亚波长光栅的结构参数包括:厚度、周期和占空比(栅瓣宽度与光栅周期的比值)。当周期和占空比只在一个方向上发生变化时,HCG被称为一维高折射率差亚波长光栅。光波入射一维高折射率差亚波长光栅,入射的光场可以解耦合为横电(TE)和横磁(TM)两种偏振态。某一种偏振态的入射波只会激发与该偏振态相对应的HCG模,而不会激发与该偏振态正交的另一种偏振态所对应的HCG模。因此,通过选择合适的光栅结构参数,一维高折射率差亚波长光栅可以对特定偏振态的入射光波产生极高的反射率。当周期和占空比分别在光栅平面上相互垂直的两个方向上同步发生变化时,HCG被称为二维高折射率差亚波长光栅。光波入射二维高折射率差亚波长光栅,将产生混合的HCG模。其中,仅光场方向不同的垂直入射光会激发相同的HCG模。也就是说,选择合适的光栅结构参数,二维高折射率差亚波长光栅可以对任一种光场方向平行于光栅平面的垂直入射光产生极高的反射率。近年来,对偏振不敏感的二维高折射率差亚波长光栅反射镜的应用范围日益宽广。例如,有研究人员使用偏振不敏感的亚波长光栅反射镜来代替传统的VCSEL中的DBR。改进后的新型VCSEL可以用于激光多普勒测速<sup>[11]</sup>,也可以在光缓存<sup>[12]</sup>中用于产生两种不同偏振态的激光来代表0和1,从而构造出二进制序列。

近年来,基于二维高折射率差亚波长光栅的偏振不敏感高反镜得到了广泛的关注和研究。研究的结构主要包括将两层条形光栅垂直交叠构成的亚波长光栅,将单层条形光栅垂直交叉构成的单层亚波长光栅和单层块状亚波长光栅,其中:两层条形光栅垂直交叠构成的亚波长光栅结构可以保证反射率在200 nm的光谱范围内超过99%,但是这种光栅结构的制作过于复杂,而且不利于集成在其他光电子器件上<sup>[13]</sup>;单层条形光栅垂直交叉构成的亚波长光栅结构可以保证反射率在158 nm的光谱范围内超过99%<sup>[14]</sup>;光栅层厚度是460 nm的单层块状高折射率差亚波长光栅最多可在161 nm的光谱范围内保证超过99%的反射率<sup>[15]</sup>。

本文旨在研究具有更宽光谱宽度的偏振不敏感二维块状高折射率差亚波长光栅反射镜,设计的关键在于确定光栅结构参数中的周期和占空比。通过迭代优化算法,当获得最优结构参数时,光栅反射镜可以保证反射率在182 nm的光谱范围内超过99%。数值仿真的结果还显示亚波长光栅反射镜的周期和占空比在制作过程中允许存在一定误差。针对二维块状高折射率差亚波长光栅反射镜,选取最优周期和占空比时所采用的迭代优化算法,同样适用于对任意光栅选取最优结构参数值。

## 2 光栅设计

### 2.1 设计原理

设计的二维块状亚波长光栅上表面类似于棋盘结构,如图1所示。每个周期是一块正方形区域,看作棋盘上的一个小格,正方形的边长是光栅周期 $\Lambda$ ;每个小格中间有一个长方体的光栅小块,看作棋盘上的棋子,长方体的顶面也是正方形,小块宽度为 $\omega$ 。SOI晶片的顶层硅层用于刻蚀出二维光栅结构,厚度为500 nm;晶片的中间层是SiO<sub>2</sub>,厚度是500 nm。入射的空气介质、SOI晶片的顶层硅和SiO<sub>2</sub>层的折射率分别为1.0, 3.47, 1.47。

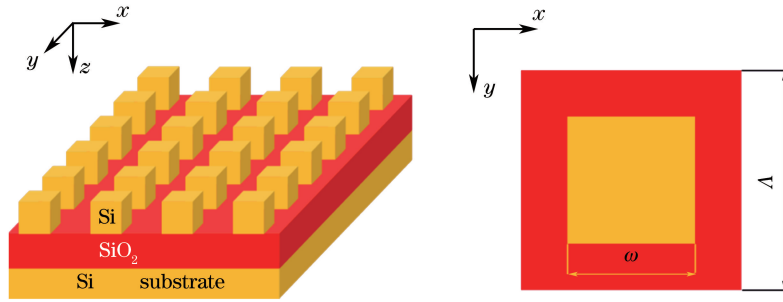


图1 二维块状亚波长光栅结构示意图

Fig. 1 Structure of 2D blocky HCG

要制作亚波长光栅反射镜,关键在于分析亚波长光栅的反射特性。一种常用的分析方法是严格耦合波分析(RCWA)法<sup>[16]</sup>。RCWA根据光栅结构的周期性,先将入射光的表达式按傅里叶级数展开,代入麦克斯韦方程组,利用边界条件来建立各衍射级次的耦合波方程,再求解反射光的衍射情况。RCWA在理论推导中不存在近似,计算结果的收敛性和准确性也已经得到了验证,是一种精确求解麦克斯韦方程组的方法。因此,RCWA可以用于分析光栅结构与衍射的反射光之间的关系。然而,考虑到巨大的计算量,它最适于设计结构简单的平面亚波长光栅。在实际仿真过程中,综合考虑计算机的性能、计算时间和计算的精度,采用 $10 \times 10$ 的衍射级次来保证计算结果的准确性。

## 2.2 设计方法

选择长方体结构作为亚波长光栅的光栅瓣小块,小块的顶面是正方形。研究发现,在厚度不变的情况下,亚波长光栅的反射特性只受光栅的周期和占空比( $\eta = \omega/\Delta$ )这两个变量因素的影响。因此,要设计一个亚波长光栅反射镜,对包含1550 nm波长的尽可能宽的入射光光谱产生超过99%以上的反射率,关键在于确定合适的光栅周期和占空比。由此,设计目标抽象为确定简单结构的两个结构参数变量,使该结构的目标函数达到极大值。这里目标函数是反射率超过99%的光谱宽度,采用迭代优化算法来实现设计。

迭代优化算法是优化问题中的一种常用解决方法,所谓优化,就是搜索出使目标函数取得极值的自变量值。在本设计中,光栅结构的目标函数 $B(x, y)$ 是反射率超过99%的反射光谱宽度,两个自变量 $x, y$ 分别是光栅周期 $\Delta$ 和光栅占空比 $\eta$ ,通过迭代优化算法,搜索出使函数 $B(\Delta, \eta)$ 取极大值的自变量 $\Delta$ 和 $\eta$ 。

迭代优化算法中一种简单直接的搜索方法是交替变量搜索法。在自变量建立的取值平面上先选择一个变量的方向展开搜索,沿着这个方向前进并到达这个方向上的一个局部极大值点,接下来再从这个点出发选择另一个变量的方向作为搜索方向,重复上述过程。整个过程虽然是坚固、可靠和自动的,但从直观上看,前进的过程是迂回式的,在接近目标函数收敛点时进展会很缓慢,也可能在靠近收敛点的附近停滞不前。因此,对这个方法做适当的改进,在搜索开始之前预设一个可接受的目标函数阈值,当搜索到的目标函数值超过阈值时,判定为可接受,就跳出循环。接着,将这个超过阈值的函数值所对应的变量值作为中心值,采用蒙特卡罗方法,在中心值的附近随机搜索一些变量值,比较这些变量所对应的函数值,选择其中的极大值作为整个过程的极值。

具体的设计方法如下:首先,确定变量的取值范围,建立初始值集合。目标函数是包含1550 nm波长且反射率大于99%的光谱的宽度 $B$ 。根据该条件,先确定光栅周期的取值集合,要求1550 nm波长的入射光的反射率大于99%。运用RCWA,计算入射光波长为1550 nm时,光栅周期和占空比与光栅反射率的对应关系,如图2所示。

从图2中确定反射率大于99%的区域,区域内每个点对应一个光栅周期,不同的光栅周期构成交替变量搜索法的周期初始值集合,初始化光栅周期 $\Delta = \Delta_0$ 。已知光栅的光谱宽度是反射率大于99%、包含1550 nm波长的入射光光谱范围,预设一个期望的高反光谱宽度值 $B$ 。作为循环结束的判断条件。之后,通过交替变量搜索法选取出一对光栅周期和占空比,算法的流程图如图3所示。

实现过程如下:

1) 从周期的初始值集合中取出一个未被取过的周期 $\Delta_0$ 作为光栅的固定周期,对迭代优化算法进行初

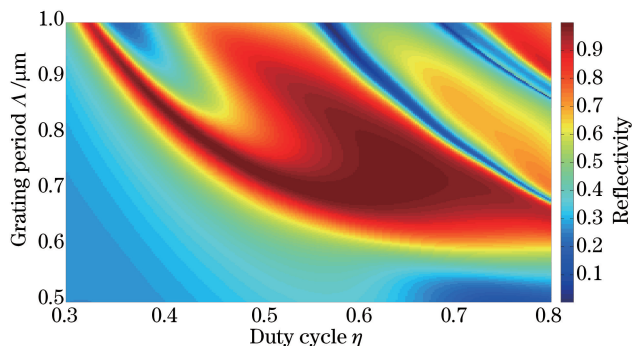


图2 反射率与光栅周期、占空比的对应关系

Fig. 2 Reflectivity as a function of grating period as well as duty cycle

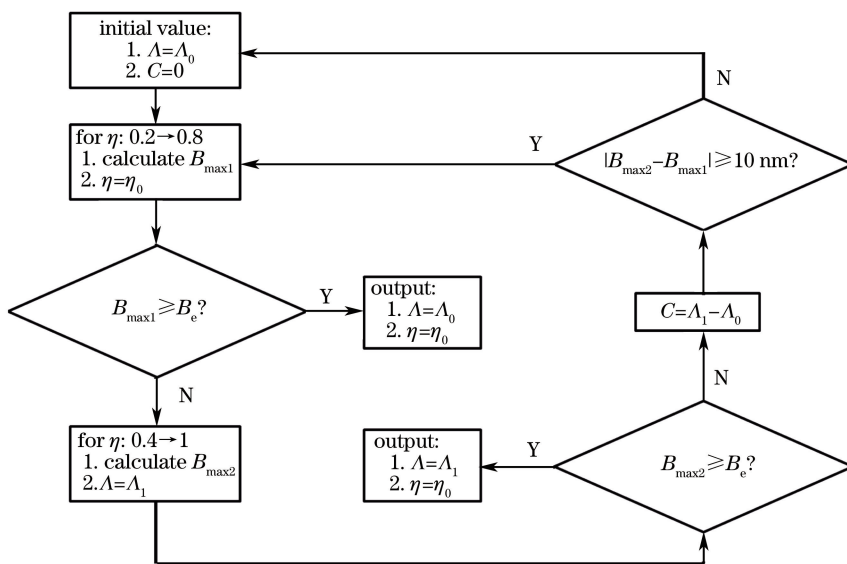


图3 优化算法的流程图

Fig. 3 Flowchart of the optimization algorithm

始化,同时,设置计算循环中周期初始值偏移量的计数器  $C$ ,在初始值的偏移量范围内的周期标记为已取出,将计数器置 0;

2) 在固定周期  $\Lambda_0$  下,记录不同占空比  $\eta$  中最宽的光谱宽度  $B_{\max 1}$  以及它对应的占空比值  $\eta_0$ ;

3) 将记录的光谱宽度与期望的光谱宽度值  $B_e$  比较,如果记录值较大,则将期望的光谱宽度值更新为当前的记录值,输出该光谱宽度对应的周期和占空比,作为当前的最优值;如果记录值比期望的光谱宽度值小,则继续进行下一步;

4) 将步骤 2) 记录的占空比值  $\eta_0$  作为光栅的固定占空比,计算不同周期下的光谱宽度,记录最宽的光谱宽度  $B_{\max 2}$  以及它对应的周期值  $\Lambda_1$ ;

5) 将记录的光谱宽度值与期望的光谱宽度值比较,若记录值较大,则将期望的光谱宽度值更新为当前的记录值,输出该光谱宽度对应的周期和占空比,作为当前的最优值;若记录值比期望的光谱宽度值小,则计算初始值偏移量  $C = \Lambda_1 - \Lambda_0$ ,将周期初始值集合中从  $\Lambda_0$  到  $\Lambda_1$  范围内的周期值标记为已取出;

6) 判断  $B_{\max 2}$  与  $B_{\max 1}$  两者之差的绝对值,若大于 10 nm,则将步骤 4) 记录的周期值  $\Lambda_1$  作为固定的周期,返回步骤 2) 循环执行,若  $B_{\max 2}$  与  $B_{\max 1}$  两者之差的绝对值小于 10 nm,则返回步骤 1) 循环执行。

以上循环的返回值可能是光谱宽度的极大值,也可能是逼近极大值的某个值,需要进一步确定返回值是不是极大值。假设循环返回的光谱宽度对应的光栅周期为  $\Lambda_i$ ,占空比为  $\eta_i$ ,以它们为中心值,采用蒙特卡罗方法搜索周边区域,确定该区域内的极大值。周边区域的任意周期  $\Lambda_r$  和占空比  $\eta_r$  可以分别表示为

$$\Lambda_r = \Lambda_i + \alpha \cdot \Delta\Lambda, \quad (1)$$



$$\eta_r = \eta_i + \beta \cdot \Delta\eta, \quad (2)$$

式中  $\Delta\Lambda = 20 \text{ nm}$ ,  $\Delta\eta = 0.02$ ,  $\alpha$  和  $\beta$  由伪随机数发生器产生, 取值在  $(-1, 1)$  区间内, 产生的每一对周期和占空比作为一组, 共取 8 组。将这 8 组变量对应的目标函数值即光谱宽度与之前交替变量搜索中返回的目标函数值比较, 选择其中的最大值作为迭代优化算法返回的最终极大值, 目标函数最大值对应的周期和占空比, 即是设计所需的结构参数。也就是说, 在该结构参数下, 光栅的光谱宽度最宽。

### 3 仿真与结果分析

根据介绍的光栅设计方法, 采用迭代优化算法遍历初始值集合, 可以得到当光栅周期为  $708 \text{ nm}$ , 光栅占空比为  $0.586$  时, 二维块状高折射率差亚波长光栅对最宽波长范围内的垂直入射光的反射率达到  $99\%$  以上。通过 RCWA 计算出此结构参数下光栅反射率和透射率随垂直入射光波长的变化关系, 如图 4 所示。

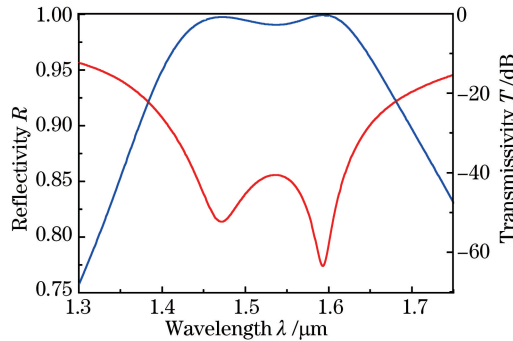


图 4 光栅的反射谱和透射谱

Fig. 4 Reflection and transmission spectrum of the grating

图 4 显示了最优结构参数的亚波长光栅对不同波长的垂直入射光波的反射光谱和透射光谱。其中, 透射光谱在阻带范围内有两处剧烈的凹陷突变, 相对应的反射光谱也将会产生两处峰值, 类似于产生了导模共振现象, 使得亚波长光栅的高反光谱宽度展宽。正如图 4 中反射光谱所示的, 周期为  $708 \text{ nm}$ , 占空比为  $0.586$  即光栅小块宽度为  $410 \text{ nm}$  的二维块状高折射率差亚波长光栅, 对  $1439 \sim 1621 \text{ nm}$  波长范围内的垂直入射光, 具有超过  $99\%$  的反射率, 光谱宽度达到  $182 \text{ nm}$ 。同时, 对于任意偏振方向的垂直入射光, 仿真得到的光栅反射光谱与图 4 完全相同。

图 5 考察不同入射角的入射光对光栅反射率的影响。从图 5(a) 中可以看出, 当入射角从  $3^\circ$  逐渐增大到  $7^\circ$  的过程中, 反射光谱在  $1439 \sim 1621 \text{ nm}$  波长之间的高反光谱宽度基本保持不变。值得注意的是, 与图 4 中垂直入射的反射光光谱不同, 斜入射的反射光光谱中各入射角度的光波的反射率在  $1355 \text{ nm}$  波长附近产生突变, 都有一次剧烈的衰减。这是因为对称的光栅结构使得垂直入射的光波在光栅结构内部只会激发出偶次模, 而斜入射的光波将会激发出反射光波中的奇次模。当光栅中某一波长光波的奇次模在高 Q 因子的影响下产生谐振, 这部分特定波长的光波将透射出光栅, 从而使得光栅的反射率在该波长处产生突变急剧下

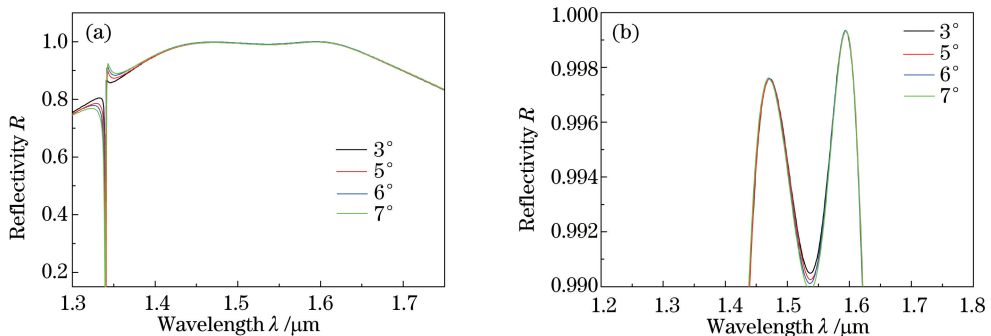


图 5 斜入射的光栅反射谱。(a) 入射角分别为  $3^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $6^\circ$  和  $7^\circ$ ; (b) 反射率大于  $99\%$  的部分

Fig. 5 Reflection spectrum of grating at an oblique incidence. (a) Incidence angles are  $3^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $6^\circ$  and  $7^\circ$ , respectively;

(b) reflection spectrum with reflectivity higher than  $99\%$

降。图 5(b)是图 5(a)中反射率大于 99% 的局部图,可以看出,当入射角从  $3^\circ$  逐渐增大到  $7^\circ$  的过程中,1536 nm 波长附近的反射率逐渐减小,直到入射角为  $7^\circ$  时,1536 nm 波长处的反射率下降到了 99% 以下。所以,要使反射光谱在 1439~1621 nm 波长之间的反射率保持在 99% 以上,光波的入射角度不能大于  $7^\circ$ 。

由于仪器的精度等各种问题,在实际制作加工过程中,二维块状亚波长光栅的周期和小块宽度都可能出现误差,因此只能尽可能要求光栅的这两个结构参数满足最优值。于是,有必要进一步分析光栅的周期和小块宽度出现误差时对亚波长光栅反射镜反射特性的影响。首先,分析光栅小块宽度为最优值的条件下,光栅周期的误差对光栅反射光谱宽度的影响。固定光栅小块宽度为 410 nm,若光栅的周期因误差出现变化,则通过图 6 所示的仿真结果进行分析。

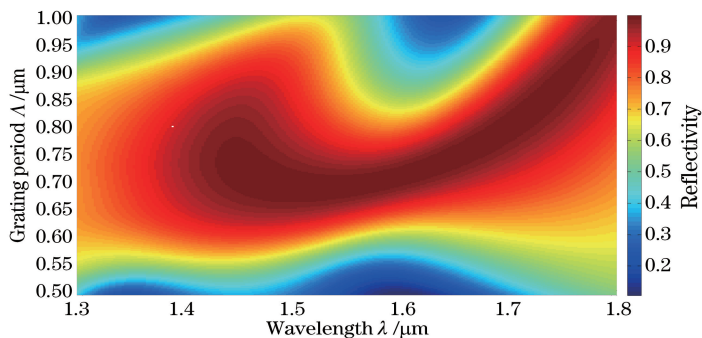


图 6 光栅反射率与光栅周期  $\Delta$ 、入射光波长  $\lambda$  的对应关系

Fig. 6 Reflectivity of grating as a function of grating period  $\Delta$  as well as wavelength  $\lambda$  of incident light

从图 6 中可以看出,当光栅的小块宽度固定为 410 nm 时,即使光栅的周期在 670~730 nm 范围内变化,二维块状亚波长光栅反射镜仍然可以对光谱范围为 182 nm 的垂直入射光实现超过 99% 以上的反射率。

接着,分析光栅周期为最优值的条件下,光栅小块宽度的误差对光栅反射光谱宽度的影响。固定光栅周期为 708 nm,若光栅的小块宽度因误差出现变化,则通过图 7 所示的仿真结果进行分析。

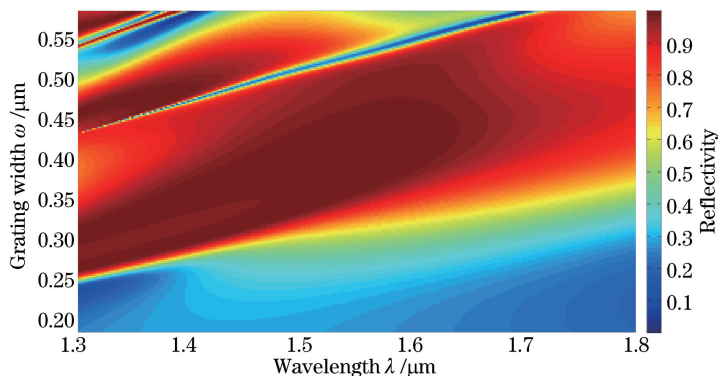


图 7 光栅反射率与光栅小块宽度  $\omega$ 、入射光波长  $\lambda$  的对应关系

Fig. 7 Reflectivity of grating as a function of grating width  $\omega$  as well as wavelength  $\lambda$  of incident light

从图 7 中可以看出,当光栅的周期固定为 708 nm 时,即使光栅小块的宽度在 390~430 nm 的区间内变化,对于垂直入射光,二维块状亚波长光栅反射镜也可以满足在 182 nm 的光谱范围内实现超过 99% 以上的反射率。

从以上分析可以得出,在本设计中,允许光栅周期的误差在最优值 708 nm 上下有 30 nm 的波动,同时光栅小块宽度的误差允许在最优值 410 nm 上下有 20 nm 的波动。因此,在实际制作光栅的过程中,电子束曝光和干法刻蚀过程产生的误差都可以控制在设计允许的误差范围之内。然而需要注意的是,以上讨论的可接受的光栅周期和光栅小块宽度的误差范围,是在固定其中一个最优值的前提下确定的。在实际的制作过程中,光栅的周期值或是小块宽度值可能同时出现误差。

## 4 结 论

使用标准的 SOI 晶片,设计了一种基于二维亚波长光栅结构,单元结构为块状长方体的偏振不敏感宽光谱高反射率反射镜。设计出的反射镜的反射特性与入射光的偏振方向无关,当入射光波的入射角小于  $7^\circ$  时,可以对包含 1550 nm 波长的 182 nm 光谱范围内的光波实现超过 99% 的反射率。仿真结果表明,设计的高反射镜对实际制作过程中有可能产生的加工误差也具有充足的容差空间。值得注意的是,设计高反射镜结构参数即二维亚波长光栅周期和占空比的过程中采用了迭代优化算法,这种方法可以广泛应用于设计圆柱形、十字形等任意形状的二维光栅表面结构参数。

## 参 考 文 献

- [1] Yu N F, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces[J]. *Nature Materials*, 2014, 13(2): 139-50.
- [2] Huang M C Y, Zhou Y, Chang-Hasnain C J. A surface-emitting laser incorporating a high-index-contrast subwavelength grating[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(2): 119-122.
- [3] Zhang B, Wang Z R, Brodbeck S, *et al.* Zero-dimensional polariton laser in a subwavelength grating-based vertical microcavity[J]. *Light Science & Applications*, 2014, 3(1): e135.
- [4] Yang Yisu, Huang Yongqing Huang Hui, *et al.* Design of photodetector with subwavelength grating structure[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(9): 2352-2357.  
杨一粟, 黄永清, 黄 辉, 等. 一种具有亚波长光栅结构的光探测器的设计[J]. *中国激光*, 2009, 36(9): 2352-2357.
- [5] Chang-Hasnain C J, Yang W J. High-contrast gratings for integrated optoelectronics[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2014, 4(3): 379-440.
- [6] Mateus C F R, Huang M C Y, Chen L, *et al.* Broad-band mirror (1.12~1.62  $\mu\text{m}$ ) using a subwavelength grating[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(7): 1676-1678.
- [7] Magnusson R, Shokooh-Saremi M. Physical basis for wideband resonant reflectors[J]. *Optics Express*, 2008, 16(5): 3456-3462.
- [8] Karagodsky V, Sedgwick F G, Chang-Hasnain C J. Theoretical analysis of subwavelength high contrast grating reflectors[J]. *Optics Express*, 2010, 18(16): 16973-16988.
- [9] Grundl T, Zogal K, Debernardi P, *et al.* Continuously tunable, polarization stable SWG MEMS VCSELs at 1.55  $\mu\text{m}$  [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(9): 841-843.
- [10] Duan Xiaofeng, Huang Yongqing, Ren Xiaomin, *et al.* High-efficiency InGaAs/InP photodetector incorporating SOI-based concentric circular subwavelength gratings[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(10): 863-865.
- [11] Albert J, Soriano M C, Veretennicoff I, *et al.* Laser doppler velocimetry with polarization-bistable VCSELs[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, 10(5): 1006-1012.
- [12] Kawaguchi H, Mori T, Sato Y, *et al.* Optical buffer memory using polarization-bistable vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006, 45(34): L894-L897.
- [13] Zhao D Y, Yang H J, Ma Z Q, *et al.* Polarization independent broadband reflectors based on cross-stacked gratings[J]. *Optics Express*, 2011, 19(10): 9050-9055.
- [14] Kazuhiro Ikeda, Kazuma Takeuchi, Kentaro Takayose, *et al.* Polarization-independent high-index contrast grating and its fabrication tolerances[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(5): 1049-1053.
- [15] Mote R G, Yu S F, Zhou W, *et al.* Design and analysis of two-dimensional high-index-contrast grating surface-emitting lasers[J]. *Optics Express*, 2009, 17(1): 260-265.
- [16] Moharam M G, Gaylord T K. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1981, 71(7): 811-818.