

基于修正简化模式法的熔融石英光栅分束器设计

王 斌^{1,2} 郝 鹏¹ 吴一辉¹ 李 胤¹

(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 130033)
² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 对用于光栅优化设计初值估计的简化模式法(SMM)进行了修正。考虑介质光栅的反射对透射率的影响,从多层膜等效的角度结合模式理论,推导出介质光栅的透射效率公式,实现了对 SMM 的修正。计算结果表明,与 SMM 相比,修正后的方法与严格耦合波(RCWA)的计算偏差大大缩小,TE 和 TM 波都小于 2%。因此相对于只能提供设计参数优化初值的 SMM,该方法可对光栅参数进行优化;与 RCWA 相比,该方法将透射光栅的衍射效率表达成模式的相位差偏移和光栅与空气导纳之差引起的反射,更直观地展示了光栅衍射的物理过程。基于此修正的简化模式法(MSMM),优化设计了一个双端口光栅分束器,该光栅在 1020~1100 nm 波段,TE 波和 TM 波的 0 级和 -1 级透射效率都在 50%左右,具有较好的分束效果。

关键词 光栅;衍射理论;多层膜;相位差;分束器

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0723004

Fused-Silica Beam Splitter Grating Design Based on Modified Simplified Modal Method

Wang Bin^{1,2} Hao Peng¹ Wu Yihui¹ Li Yin¹

(¹ State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The simplified modal method (SMM), which is used to estimate the initial values of grating parameters, is modified. The reflection of dielectric grating is considered. Then grating is equivalent to multilayer thin films. Associating with the modal theory, transmission efficiency is calculated, and SMM is modified. The calculation results show that deviation between this modified method and RCWA is less than 2% for TE and TM polarizations which is better than SMM. With respect to SMM, which only gives starting value of grating parameters, this method can be used to optimize the grating parameters. Contrast to RCWA, it gives a clear physical explanation of grating diffraction by considering the transmission efficiency as the result of phase shift of modes and difference of grating and aerial admittance. Then a grating beam splitter with two ports is designed and optimized by this modification of simplified modal method (MSMM), which gets a good splitting result at the band of 1020~1100 nm. The transmission efficiency of 0th and -1st order for both TE and TM polarizations is near to 50% at this band.

Key words gratings; diffraction theory; multilayer; phase shift; beam splitter

OCIS codes 230.4170; 050.2770; 050.1960; 050.5080; 230.1360

收稿日期: 2014-02-10; **收到修改稿日期**: 2014-03-13

基金项目: 国家 863 计划(2012AA040503)、国家自然科学基金重点项目(11034007)、国家青年基金科学基金(61102023)、中国科学院科研装备研制项目(yz201353)、吉林省科技发展计划项目(20120329)

作者简介: 王 斌(1982—),男,博士研究生,主要从事二元光栅的设计优化方面的研究。

E-mail: wangbinhs@hotmail.com

导师简介: 吴一辉(1965—),女,研究员,博士生导师,主要从事微光机电系统、光学传感器和声波传感器等方面的研究。

E-mail: yihuiwu@ciomp.ac.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

1 引言

双端口分束器在诸如光通信、光计算、全息摄影、光学度量等光学元器件中具有重要的应用^[1-3]。传统的分束器,是由多层膜光栅设计得到的,这种类型的光栅,制作复杂,且容易发生热形变^[4]。而单一介质的光栅分束器则能克服这些缺点。以熔融石英为材料设计的光栅分束器,由于具有高损伤阈值,高衍射效率的特性,而被广泛研究^[5-6]。传统的光栅设计是通过严格耦合波算法(RCWA)结合非线性算法进行优化设计^[7-9],虽然 RCWA 算法可以精确计算所有类型的光栅衍射效率^[10-12],但是这个优化过程无法清晰直观地给出光栅衍射特性的物理过程,Botten 等^[13-14]提出的模式法从模式耦合的角度解释了光栅的衍射特性。另外这两种方法均无法给出合理的初值,只能通过计算机把所有的自由参量,如光栅的高度,周期等全部扫描一遍。Clausnitzer 等^[5,15]提出的简化模式法(SMM)将入射光进入介质光栅后的两个模式的耦合过程看作两束光的干涉,给出了光栅衍射过程的直观解释,而且该方法从理论上给出了待优化光栅参数合理的初值,这对于优化过程的简化是极有意义的。根据该方法,可以设计偏振分束器^[5]、偏振无关分束器^[16]和高衍射效率光栅^[17]等,但是该方法的计算过程忽略了光栅的反射,导致计算结果与 RCWA 算法存在较大偏差,这种偏差有时会达到 15% 以上^[5]。如果在该方法的计算过程中考虑介质光栅的反射,可以相应减小算法与 RCWA 的偏差。Jing 等^[18]提出了增强的简化模式法(ESMM),通过将光栅看作多层膜结构,将反射引入 SMM 分析了三角形介质光栅的 TE 波的透射效率;Sun 等^[19]提出了多重反射模式法(MRMM),从菲涅耳反射的角度改进 SMM 并计算了矩形光栅的透射效率。不过这两种方法与 RCWA 算法之间仍然可能存在 5% 的偏差^[18-19],而且这两种方法并没有推导 TM 波的公式。事实上 TM 波和 TE 波是不同的,这种不同可能会使某些情形下的光栅无法满足设计要求^[20]。

本文通过多层膜等效,将光栅的导纳引入到光栅反射的计算中,对简化模式法进行修正。推导出修正之后 TE 波和 TM 波的透射功率计算公式,并对修正后算法与 RCWA 算法的偏差进行了分析。该方法从物理过程上说明了光栅的透射效率由光栅中两个传播模式的相位差以及光栅与空气的导纳共同决定。以入射波长 1064 nm 为例,通过修正后的简化模式法计算分析了光栅的初值,并优化设

计了一种以熔融石英为材料的光栅分束器。

2 对简化模式法的修正

假设入射光(波长为 λ)经过折射率 $n_{\text{air}}=1$ 的空气进入光栅区,光栅周期为 d ,当入射角为一阶布拉格角 $\theta_{\text{in}}=\arcsin[\lambda/(2n_{\text{air}}d)]$ 时,由光栅公式可知只能存在两个衍射级次 0 级和 -1 级,且此时 0 级和 -1 级的衍射角 θ_0 和 θ_{-1} 相等。简化模式法的出发点是当入射光以一阶布拉格角入射,且波长 λ 和光栅周期满足 $\lambda/2 < d < 3\lambda/(2n_{\text{sub}})$ 时,光栅层中只存在两个传播模式,其中 n_{sub} 是光栅基底的折射率。在此条件下,两个传播模式的能量几乎相等,因此可以将光栅看作是马赫-曾德尔干涉仪^[15,21]。每个模式可以看作是以 $k_z=k_0 n_{\text{eff}}$ ($k_0=2\pi/\lambda$ 是入射光在空气中的波数)为传播常数的光波,经过光栅层之后在光栅的出射端发生干涉,等效折射率 n_{eff} 由色散公式给出,色散公式为^[22]

$$\cos(\alpha d) = F(n_{\text{eff}}^2), \quad (1)$$

$$F(n_{\text{eff}}^2) = \cos(\beta b) \cos(\gamma g) - \frac{\beta^2 + \tau^2 \gamma^2}{2\tau\beta\gamma} \times \sin(\beta b) \sin(\gamma g), \quad (2)$$

式中 $\alpha = k_0 \sin \theta_{\text{in}}$, $\beta = k_0 (n_{\text{sub}}^2 - n_{\text{eff}}^2)^{1/2}$, $\gamma = k_0 (n_{\text{air}}^2 - n_{\text{eff}}^2)^{1/2}$, $\tau = n_{\text{sub}}^2$ (TM 偏振) 或 1 (TE 偏振), b 和 g 分别是光栅脊和光栅槽的宽度, F 是 n_{eff}^2 的函数。矩形介质光栅的 $F(n_{\text{eff}}^2)$ 如图 1 所示(具体程序编写过程中,通过数学软件 Matlab 中的 fzero 命令可以快速求解出精确到 6 位有效数字的数值解)。 $F(n_{\text{eff}}^2)$ 和 $\cos(\alpha d) = -1$ 的每个交点对应一个传播模式,当 $n_{\text{eff}}^2 > 0$ 时表示传播模式,而 $n_{\text{eff}}^2 < 0$ 时表示消逝场模式。两个交点意味着在一阶布拉格角入射时,有两个传播模式被激励。此时,如果忽略光栅的反射,那

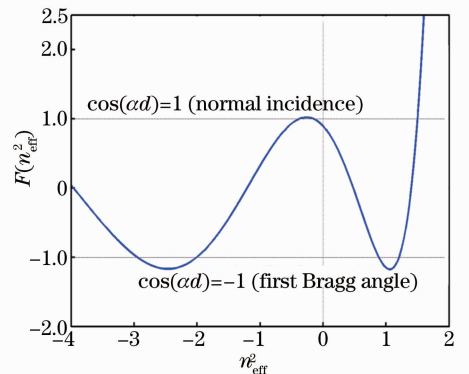


图 1 矩形介质光栅的 $F(n_{\text{eff}}^2)$ 函数示意图

Fig. 1 Function $F(n_{\text{eff}}^2)$ of a dielectric rectangular grating

么入射光经过光栅后的-1级和0级透射效率可以表示为^[6]

$$\eta_{-1T} = \sin^2 \left(\frac{k_0 h \Delta n_{\text{eff}}}{2} \right), \quad (3)$$

$$\eta_{0T} = \cos^2 \left(\frac{k_0 h \Delta n_{\text{eff}}}{2} \right), \quad (4)$$

式中 Δn_{eff} 为两个模式的等效折射率之差, $\Delta n_{\text{eff}} = n_{0\text{eff}} - n_{1\text{eff}}$, $n_{0\text{eff}}$ 、 $n_{1\text{eff}}$ 分别为两个模式的等效折射率, h 为光栅高度。为了计算光栅的反射, 将入射区、光栅区域和基底分为3层考虑, 如图2(a)所示, 由(2)式求出每一层的等效折射率等价于多层膜。首先考虑

每一层的0模(1模的情形类似), 如图2(b)所示, 每一层都可以看作折射率为 n_{eff} 的均匀介质膜。多层膜在入射界面处的等价如图2(c)所示, 在入射界面处, 将多层膜等价为一个虚拟界面, 其上部为入射介质, 导纳为 η_0 ; 下部为光栅层, 导纳 $Y = H_0/E_0$, 其中 H_0 和 E_0 分别是平行于边界的磁场和电场分量。由于上述两个过程电磁场在光栅外部和光栅区域都满足亥姆霍兹方程和边界条件, 因此这种等效是合理的。

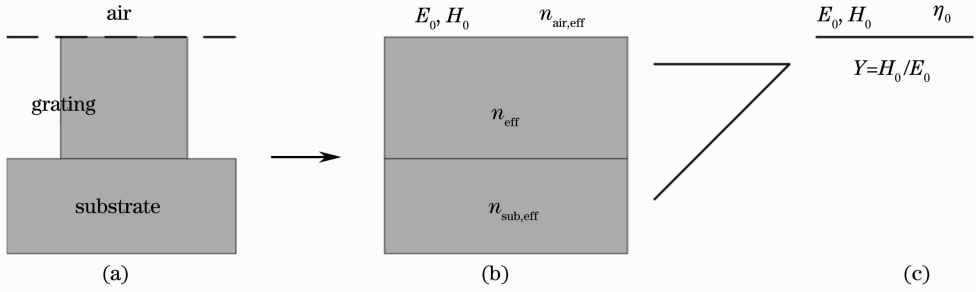


图2 (a)光栅分层; (b)多层膜等价; (c)多层膜在入射界面处的等价

Fig. 2 (a) Division of grating; (b) multilayer films equivalence; (c) equivalent interface of multilayer films

由光学薄膜理论可知等效后光栅的导纳为^[23]

$$Y = \frac{H_0}{E_0} = \frac{\eta_{\text{sub}} \cos \delta_1 + i\eta_1 \sin \delta_1}{\cos \delta_1 + i(\eta_{\text{sub}}/\eta_1) \sin \delta_1}, \quad (5)$$

多层膜的反射率和透射率的计算公式可表示为

$$R = \left(\frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right) \left(\frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right)^*, \quad (6)$$

$$T = 1 - R = \frac{4\eta_0 \eta_{\text{sub}}}{(\eta_0 B + C)(\eta_0 B + C)^*}, \quad (7)$$

式中 $B = \cos \delta_1 + i(\eta_{\text{sub}}/\eta_1) \sin \delta_1$, $C = \eta_{\text{sub}} \cos \delta_1 + i\eta_1 \sin \delta_1$, $\delta_1 = 2\pi h n_{\text{eff}}/\lambda$ 是光栅层的相位改变, 当入射光为 TE 偏振时, $\eta_0 = \cos(\theta_{\text{in}})$, $\eta_1 = n_{\text{eff}}$, $\eta_{\text{sub}} =$

$n_{\text{sub,eff}}$, 当入射光为 TM 偏振时, $\eta_0 = 1/\cos(\theta_{\text{in}})$, $\eta_1 = (n_{\text{eff}}^2 + \sin^2(\theta_{\text{in}}))/n_{\text{eff}}$, $\eta_{\text{sub}} = n_{\text{sub}}^2/n_{\text{sub,eff}}$, 其中 $n_{\text{sub,eff}} = (n_{\text{sub}}^2 - \sin^2 \theta_{\text{in}})^{1/2}$ 是光栅基底的等效折射率。那么光栅的-1级和0级透射效率可以修正为

$$\eta_{-1T} = \left(1 - \frac{R_0}{2} - \frac{R_1}{2} \right) \sin^2 \left(\frac{k_0 h \Delta n_{\text{eff}}}{2} \right), \quad (8)$$

$$\eta_{0T} = \left(1 - \frac{R_0}{2} - \frac{R_1}{2} \right) \cos^2 \left(\frac{k_0 h \Delta n_{\text{eff}}}{2} \right), \quad (9)$$

式中 R_0 和 R_1 分别是模式0和模式1的反射率。两个模式的能量几乎相等, 因此它们所占的权重都是 $1/2$ 。

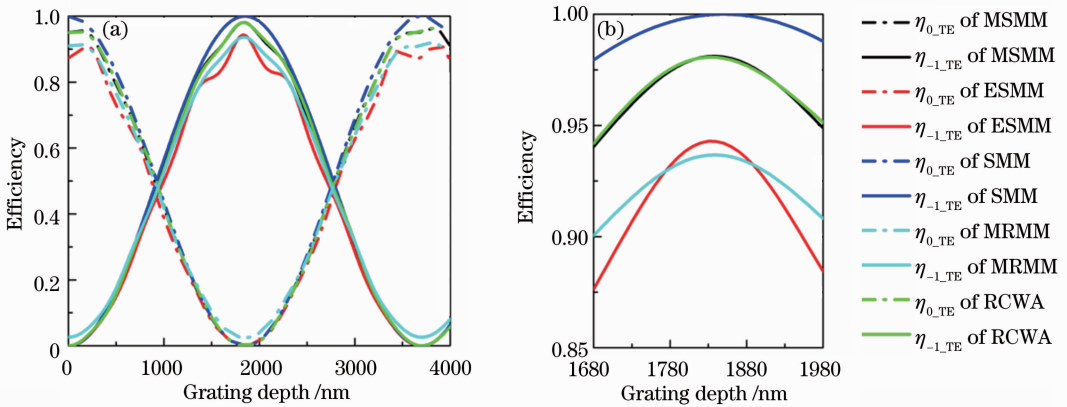


图3 MSMM,SMM,ESMM,MRMM与RCWA算法比较(TE偏振)。(a)透射效率; (b)图(a)的局部放大

Fig. 3 Comparison of MSMM, SMM, ESMM, MRMM and RCWA for TE polarization. (a) Transmission efficiencies; (b) magnification of Fig. (a)

为了阐明修正后的简化模式法 (MSMM) 的准确性,应用该算法对矩形光栅的衍射效率进行计算,并将结果以及其他算法的结果与 RCWA 算法的结果进行了对比,如图 3 和图 4 所示。假设光栅材料为熔融石英,对应的折射率为 $n_{\text{sub}}=1.45$,入射角为一阶布拉格角,矩形光栅的周期 $d=1064$ nm,占空比 $f=0.5$,入射波长为 1064 nm(由于文献[18-19]只计算了 TE 偏振的情形,而 TM 偏振与 TE 偏振是不同的,故图 4 没有给出 ESMM 和 MRMM 的结果)。从图 3 和图 4 中可以看出,修正后的算法与

RCWA 算法的偏差相较于其他算法有明显改进,不论 TE 波还是 TM 波的情形,偏差都小于 2%。因此,应用改进后的算法设计介质光栅,能够得到更准确的初值,并且能够直接进行优化设计。这种算法的准确性是由于计算过程中的导纳是考虑了入射角时的精确边界条件得到的,而导纳 Y 包含了光栅层和基底的全部信息。最后,MSMM 与 RCWA 的误差可能来源于:1)模式 0 和模式 1 的能量并不完全相等;2)未予考虑的消逝场模式对衍射级次能量分配的影响。

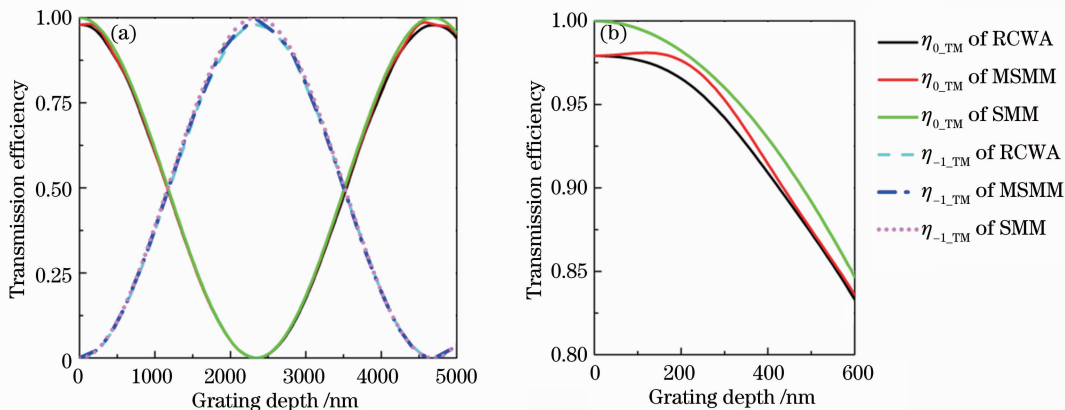


图 4 MSMM, SMM 与 RCWA 算法比较(TM 偏振)。(a)透射效率; (b)图(a)的局部放大

Fig. 4 Comparison between MSMM, SMM and RCWA for TM polarization. (a) Transmission efficiencies; (b) magnification of Fig. (a)

3 介质光栅分束器的设计

分束器是一种常用的光学器件,能够将入射光的能量平均分配到几个不同的输出方向。如果所设计的光栅能够使得 TE 和 TM 波的 0 级 -1 级衍射效率同时接近 50%,该光栅就可以作为一个双端口分束器。为此,需要对光栅的参数进行设计,使得光栅在 TE 和 TM 偏振时只存在 0 级和 -1 级两个衍射级次,且衍射效率相等,那么光栅即满足设计要求。当入射光以一阶布拉格角入射,且波长 λ 和光栅周期满足 $\lambda/2 < d < 3\lambda/(2n_{\text{sub}})$,矩形介质光栅中的传播模式之差满足 $\frac{\Delta n_{TM}}{\Delta n_{TE}} = \frac{n_{0\text{eff_TM}} - n_{1\text{eff_TM}}}{n_{0\text{eff_TE}} - n_{1\text{eff_TE}}} = \frac{2l-1}{2m-1}$ (l, m 为正整数)时,通过简化模式法计算得到的 TE 和 TM 波的衍射效率相等^[24],其中 Δn_{TM} 和 Δn_{TE} 分别为 TM 和 TE 波的等效折射率之差, $n_{i\text{eff_TM}}$ 和 $n_{i\text{eff_TE}}$ 分别为 TM 和 TE 波的第 i ($i=0, 1$) 模式的等效折射率。为了简化分析,取 $l=m=1$,此时 $\frac{\Delta n_{TM}}{\Delta n_{TE}} = \frac{n_{0\text{eff_TM}} - n_{1\text{eff_TM}}}{n_{0\text{eff_TE}} - n_{1\text{eff_TE}}} = 1$,矩形光栅周期随占空

比的变化如图 5 所示,在波长 $\lambda=1064$ nm,入射角为一阶布拉格角时,为满足 $\Delta n_{TM}/\Delta n_{TE}=1$,随着光栅周期的减小,矩形光栅的占空比增大,因此深宽比相应地增大,带来加工难度的增加。虽然在光栅周期 $d=1100$ nm 时,光栅对应的深宽比最小,但是如前所述,只有满足 $\lambda/2 < d < 3\lambda/(2n_{\text{sub}})$ 时,光栅区存在两个传播模式且光栅只有两个透射级次,由

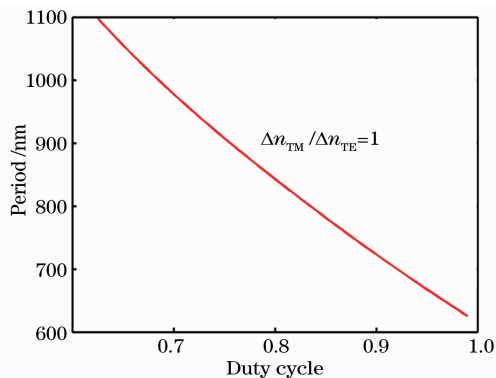


图 5 $\Delta n_{TM}/\Delta n_{TE}=1$ 时矩形光栅周期随占空比的变化
Fig. 5 Rectangular grating period versus duty cycle when $\Delta n_{TM}/\Delta n_{TE}=1$

SMM 可知,此时能量只集中在 0 级和 -1 级上。事实上,当 $d > 3\lambda / (2n_{\text{sub}})$ 时,由于增加的光栅衍射级次可能携带一部分能量,以及增加的传播模式对能量分配的影响,光栅难以将全部能量集中到 0 级和 -1 级上。而此时 $3\lambda / (2n_{\text{sub}}) = 1100.7 \text{ nm}$,考虑到可能会出现加工误差,取光栅周期为 $d = 1000 \text{ nm}$ 。

应用修正后的简化模式法设计光栅分束器,假定 $\lambda = 1064 \text{ nm}$,入射角为一阶布拉格角 $\theta_m = \arcsin [\lambda / (2n_{\text{air}} d)] = 30.48^\circ$ 。首先设定光栅的 TE 和 TM 波的 0 级与 -1 级衍射效率同时最接近 50% 时为最佳结果。为此定义衍射效率标准差为

$$\sigma = \sqrt{(\eta_{0\text{-TE}} - 0.5)^2 + (\eta_{-1\text{-TE}} - 0.5)^2 + (\eta_{0\text{-TM}} - 0.5)^2 + (\eta_{-1\text{-TM}} - 0.5)^2}. \quad (10)$$

显然, σ 越小光栅对于入射光能量的利用率越高,且各级次能量接近,分束效果越好。由图 5 可知,当光栅周期 $d = 1000 \text{ nm}$ 时,对应的占空比 $f = 0.685$ 。为使各级次的衍射效率为 50%,由(1)~(3)式可以求出此时的等效折射率之差 $\Delta n_{\text{TM}} = n_{0\text{eff-TM}} - n_{-1\text{eff-TM}} = 1.29225 - 1.09212 = 0.20013$,对应的光栅高度 $h = \lambda / (4\Delta n_{\text{TM}}) = 1329 \text{ nm}$,这是没有考虑反射的理想状态下,由 SMM 给出的光栅参数初值。通过 RCWA 计算的衍射效率如表 1 所示,根据表 1 可知此时的衍射效率标准差 $\sigma = 0.0365$ 。由于 SMM 可能高达 15% 的误差,无法确定此参数对应的光栅结构是否

满足设计要求。应用 RCWA 进行下一步优化其结果如图 6(a) 所示。结果表明当占空比为 $f = 0.670$,光栅槽深 $h = 1296 \text{ nm}$ 时, $\sigma = 0.0300$ 最小。

在上述优化过程中,为了保证 RCWA 算法的准确性,算法中的矩阵维数需要在 30 阶以上。而在 MSMM 算法中,计算量最大的部分 Y 可以看作两个 2 阶行列式的商,因此计算量大大减小。图 6(b) 即是应用该算法进行优化的结果,可以看出当占空比为 $f = 0.674$,光栅槽深 $h = 1298 \text{ nm}$ 时, $\sigma = 0.0302$ 最小。

表 1 各种算法得到的透射效率及对应的标准差

Table 1 Transmission efficiencies and standard deviations by different methods

	f	h / nm	σ	$\eta_{0\text{-TE}} / \%$	$\eta_{-1\text{-TE}} / \%$	$\eta_{0\text{-TM}} / \%$	$\eta_{-1\text{-TM}} / \%$
SMM	0.685	1329	0.0365	48.61	46.90	49.05	49.07
RCWA	0.670	1296	0.0300	47.94	48.24	49.46	48.84
MSMM(a)	0.674	1298	0.0302	47.56	48.61	50.06	48.86
MSMM(b)	0.674	1298	0.0323	48.57	47.51	49.74	48.54

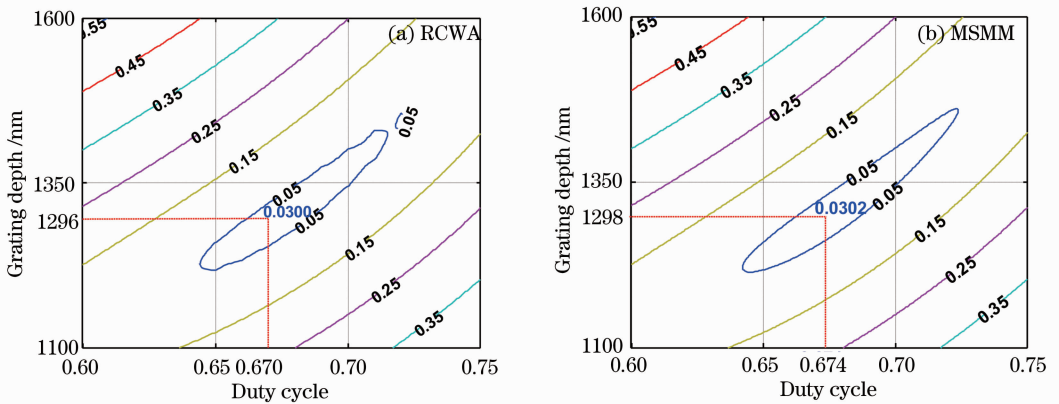


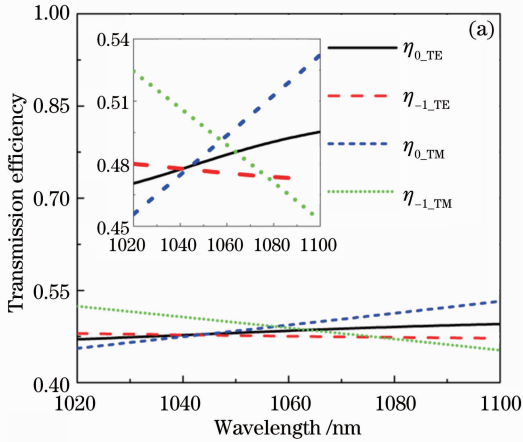
图 6 透射效率标准差随光栅占空比和光栅槽深变化的等高线图

Fig. 6 Contour maps of transmission efficient standard deviation versus duty cycle and grating depth

下面计算各算法得到的光栅参数所对应的具体衍射效率及标准差,以评估通过 MSMM 优化得到的结果能否达到设计要求,相应结果如表 1 所示。其中 SMM 的 f 和 h 由此算法得到,衍射效率 η 和标准差 σ 为对应参数下由 RCWA 算法得到;

MSMM(a)的参数 f 、 h 和衍射效率 η ,标准差 σ 都由 MSMM 优化计算得到;MSMM(b)的参数 f 和 h 由 MSMM 优化得到,衍射效率 η 和标准差 σ 为对应参数下由 RCWA 计算得到。分析可知,对于固定波长 $\lambda = 1064 \text{ nm}$ 通过 MSMM 优化得到结果无论是

光栅参数还是衍射效率标准差都已经很接近 RCWA 优化得到的最优结果。在对应的参数 $f=0.674$, 光栅槽深 $h=1298$ nm 时, 经过 RCWA 计算的准确衍射效率随波长的变化趋势如图 7(a) 所示, 在 1020~1100 nm 波段, 总的衍射效率标准差 $\int_{1020}^{1100} \sigma d\lambda = 3.54714$ 。图 7(b) 为 RCWA 优化的结果,



$f=0.670$, 光栅槽深 $h=1296$ nm 时, 衍射效率随波长的变化趋势图, 总的衍射效率标准差 $\int_{1020}^{1100} \sigma d\lambda = 3.48682$ 。这说明, 不论是从加工的角度考虑, 还是从整个波段的分束效果(由 σ 的意义)考虑, 通过 MSMM 优化得到的结果都可以代替通过 RCWA 优化的最优值。

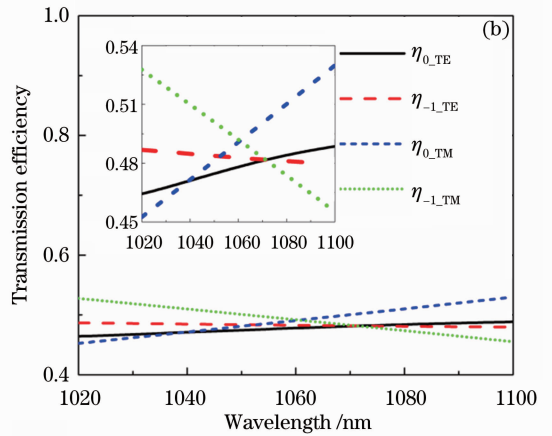


图 7 透射效率随波长的变化。(a) $f=0.674$, $h=1298$ nm; (b) $f=0.670$, $h=1296$ nm

Fig. 7 Transmission efficiency versus wavelength. (a) $f=0.674$, $h=1298$ nm; (b) $f=0.670$, $h=1296$ nm

4 结 论

从多层膜等效的角度计算了光栅的反射和透射, 对应用于光栅设计的简化模式法进行了修正。相较于其他算法与严格耦合波法 5% 以上的偏差, 修正后的方法与 RCWA 的偏差大大缩小, TE 波和 TM 波的计算误差都小于 2%, 这不但可以确定光栅参数的初值, 更能代替 RCWA 进行参数优化。应用修正后的算法, 设计优化了一个双端口光栅分束器, 该光栅在 1020~1100 nm 波段, TE 波和 TM 波的 0 级和 -1 级衍射效率都在 50% 左右, 能够具有较好的分束效果。相对于只能提供设计参数优化初值的 SMM, 该方法可以在其基础上对光栅参数进行优化, 且计算过程相较于 RCWA 大大简化。虽然不像 RCWA 适用于任意情形的光栅计算, 但是该方法将亚波长透射光栅的衍射效率表达成相位差偏移和光栅与空气导纳之差引起的反射, 相较于 RCWA 更直观地展示了光栅衍射的物理过程。由算法的推导过程, 只要在推导中将光栅区分为 N 层, 即将模型中的三层膜变为 N 层膜, 然后按照多层膜理论, 把该多层膜等效成一个界面, 可以将该方法推广到三角形和正弦形介质光栅, 这对于介质光栅的设计优化具有积极地作用。

参 考 文 献

- Zhou Fei, Fei Hongming, Chen Zhihui, *et al.*. A high efficiency photonic crystal polarization beam splitter [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(6): 062304.
周 飞, 费宏明, 陈智辉, 等. 一种高效光子晶体偏振光分束器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(6): 062304.
- Li Rongmin, Cao Ye, Tong Zhengrong. Short length polarization splitter based on dual elliptical-core photonic crystal fiber [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(10): 1005004.
李荣敏, 曹 晔, 童峥嵘. 短长度的双椭圆纤芯光子晶体光纤偏振分束器 [J]. *中国激光*, 2012, 39(10): 1005004.
- Ren Yitao, Huang Chuyong, Luo Jinlong. Design and fabrication of heavy germanium loading waveguide splitters and couplers by UV exposure method [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(9): 092301.
任一涛, 黄楚勇, 罗金龙. 紫外曝光法制备高掺锗光波导分束器及耦合器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(9): 092301.
- J Kim, J R Birge, V Sharma, *et al.*. Ultrabroadband beam splitter with matched group-delay dispersion [J]. *Opt Lett*, 2005, 30(12): 1569-1571.
- T Clausnitzer, T Kämpfe, E B Kley, *et al.*. Investigation of the polarization-dependent diffraction of deep dielectric rectangular transmission gratings illuminated in Littrow mounting [J]. *Appl Opt*, 2007, 46(6): 819-826.
- J Zheng, C Zhou, J Feng, *et al.*. Polarizing beam splitter of deep-etched triangular-groove fused-silica gratings [J]. *Opt Lett*, 2008, 33(14): 1554-1556.
- J Pietarinen, T Vallius, J Turunen. Wideband four-level transmission gratings with flattened spectral efficiency [J]. *Opt Express*, 2006, 14(7): 2583-2588.
- J Wang, Y Jin, J Ma, *et al.*. Design and analysis of broadband high-efficiency pulse compression gratings [J]. *Appl Opt*, 2010, 49(16): 2969-2978.

- 9 Fan Shuwei, Zhou Qinghua, Li Hong. Research of optimization design of groove diffraction grating profile parameters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(11): 3133–3139.
樊叔维, 周庆华, 李 红. 槽型衍射光栅结构参数优化设计研究 [J]. *光学学报*, 2010, 30(11): 3133–3139.
- 10 M G Moharam, T K Gaylord. Diffraction analysis of dielectric surface-relief gratings [J]. *J Opt Soc Am*, 1982, 72(10): 1385–1392.
- 11 M G Moharam, T K Gaylord. Rigorous coupled-wave analysis of metallic surface-relief gratings [J]. *J Opt Soc Am A*, 1986, 3(11): 1780–1787.
- 12 M G Moharam, D A Pommet, E B Grann, *et al.*. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach [J]. *J Opt Soc Am A*, 1995, 12(5): 1077–1086.
- 13 L C Botten, M S Craig, R C McPhedran, *et al.*. The dielectric lamellar diffraction grating [J]. *J Mod Opt*, 1981, 28(3): 413–428.
- 14 L C Botten, M S Craig, R C McPhedran, *et al.*. The finitely conducting lamellar diffraction grating [J]. *J Mod Opt*, 1981, 28(8): 1087–1102.
- 15 T Clausnitzer, T Kämpfe, E B Kley, *et al.*. An intelligible explanation of highly-efficient diffraction in deep dielectric rectangular transmission gratings [J]. *Opt Express*, 2005, 13(26): 10448–10456.
- 16 J Feng, C Zhou, J Zheng, *et al.*. Design and fabrication of a polarization-independent two-port beam splitter [J]. *Appl Opt*, 2009, 48(29): 5636–5641.
- 17 X Jing, J Zhang, S Jin, *et al.*. Design of highly efficient transmission gratings with deep etched triangular grooves [J]. *Appl Opt*, 2012, 51(33): 7920–7933.
- 18 X Jing, S Jin, J Zhang, *et al.*. Enhancement of the accuracy of the simplified modal method for designing a subwavelength triangular grooves grating [J]. *Opt Lett*, 2013, 38(1): 10–12.
- 19 W Sun, P Lv, C Zhou, *et al.*. Multireflection modal method for wideband fused-silica transmission gratings [J]. *Appl Opt*, 2013, 52(12): 2800–2807.
- 20 T Clausnitzer, T Kämpfe, E B Kley, *et al.*. Highly-dispersive dielectric transmission gratings with 100% diffraction efficiency [J]. *Opt Express*, 2008, 16(8): 5577–5584.
- 21 A V Tishchenko. Phenomenological representation of deep and high contrast lamellar gratings by means of the modal method [J]. *Opt Quantum Electron*, 2005, 37(1-3): 309–330.
- 22 P Sheng, R S Stepleman, P N Sanda. Exact eigenfunctions for square-wave gratings: application to diffraction and surface-plasmon calculations [J]. *Phys Rev B*, 1982, 26(6): 2907–2917.
- 23 Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu, *et al.*. *Modern Optical Thin Film Technology* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. 22.
唐晋发, 顾培夫, 刘 旭, 等. *现代光学薄膜技术*[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006. 22.
- 24 J Feng, C Zhou, J Zheng, *et al.*. Modal analysis of deep-etched low-contrast two-port beam splitter grating [J]. *Opt Commun*, 2008, 281(21): 5298–5301.

栏目编辑: 史 敏