

文章编号: 0253-2239(2010)11-3133-07

槽型衍射光栅结构参数优化设计研究

樊叔维 周庆华 李 红

(西安交通大学电子与信息工程学院信息光子技术重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要 通过工程优化方法与衍射光栅矢量理论相结合,对衍射光栅的结构参数进行了优化设计研究。采用严格的耦合波矢量理论分析表面浮雕光栅的衍射效率特性,并建立了具有全局寻优特性的遗传算法在衍射光栅设计中的数学模型;研究了包括双闪耀光栅在内的多种槽型衍射光栅的优化设计。优化设计表明,该方法对初始设计方案没有特殊要求,能够快速得到多种槽型衍射光栅的最优结构参数,优化后光栅的衍射效率可以达到 90% 以上,双闪耀光栅经优化设计以后在整个波段均能获得很高的衍射效率。在光栅的设计过程中采用全局工程优化算法进行分析设计,为高效率光栅的制作提供了理论指导;同时也为光栅设计的逆问题提供了一种可行的求解方法。

关键词 衍射光栅;严格的耦合波理论;优化设计;遗传算法

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103011.3133

Research of Optimization Design of Groove Diffraction Grating Profile Parameters

Fan Shuwei Zhou Qinghua Li Hong

(Key Laboratory of Information Photonic Technique, School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract The optimization design of structural parameters for diffraction grating is researched by combining the diffraction grating vector theory and the global optimization theory. Rigorous coupled wave analysis (RCWA) is used to analyze the grating diffraction efficiency properties, then the global optimization genetic algorithm (GA) model in the design of diffraction grating is established. The optimized structural parameters of several typical gratings including double-blazed grating in arbitrary incident angle are given. There are no special requirements for initial design and optimal groove diffraction grating structure can be obtained quickly. Optimized diffraction efficiency can reach more than 90%. Double-blazed grating can also get very high diffraction efficiency in the whole band after the optimization. The global engineering design optimization algorithm provides theoretical guidance for grating fabrication and also provides a feasible method for the inverse problem of grating design.

Key words diffraction grating; rigorous coupled-wave-theory analysis (RCWA); optimization design; genetic algorithm (GA)

1 引 言

衍射光栅是一种古老但是非常重要的光学元件,目前已广泛应用于光谱学、计量、集成光学、量子电子学、信息处理、光通信及航天技术等领域^[1~5]。光栅的效率是评价其性能最重要的指标之一,严格的矢量理论是分析光栅效率特性的有效手段。在任意面型函数光栅的电磁场的严格矢量理论中,最先提出了积分方法^[6,7],积分方法数学模型复杂,算法

不宜实现;进而提出了数学模型简单,便于计算的微分方法,并得到了广泛的应用。耦合波方法是 20 世纪 80 年代提出的一种严格的矢量理论分析方法^[8,9],它将光栅区域内的电磁场作空间谐波展开,通过不同区域边界的电磁场边界匹配条件得到一组无限维耦合微分方程组,采用一定的数学方法求得光栅电磁场衍射问题的精确解。它已被广泛应用于光栅结构的分析与设计中,是一种计算效率高且算

收稿日期: 2010-01-21; 收到修改稿日期: 2010-06-10

作者简介: 樊叔维(1968—),女,博士,副教授,主要从事衍射光栅理论与设计、固体激光器器件和激光物理与技术等方面的研究。E-mail: shwfan@mail.xjtu.edu.cn

法稳定性较好的方法^[10~14]。

根据衍射光栅的矢量电磁场理论分析光栅的衍射特性是一个相对来说比较简单的问题,即给定光栅的结构参数、材料特性以及入射光波参数就可以对其衍射特性进行分析。而在实际的衍射光栅设计中,往往希望设计的衍射光栅在一定条件下达到最优的衍射效率,或者根据光栅实际的应用,为获得某一衍射需求设计出合适的光栅槽型,即所谓光栅设计的逆问题。逆问题的求解与正问题相比更为复杂,因为影响衍射效率的因素很多,导致分析中计算量大,复杂程度高。A. Roger^[15]提供了一种完纯导体光栅逆问题的理论和数值分析方法,但其数学模型较为复杂;Ilkka Kallioniemi等^[16]通过模拟退火法优化了具有连续槽型结构的闪耀光栅。在模拟退火优化算法中,降温的方式对算法有很大影响。如果温度下降过快,可能会丢失极值点;如果温度下降过慢,算法的收敛速度又大大降低。

通过工程优化方法与衍射光栅矢量理论结合,可以对衍射光栅的结构参数进行优化设计,从而获得满足需求的衍射效率特性,对衍射光栅的实际设计工作将有重要的指导意义,同时也为逆问题的求解提供了一种可行的方法。在各种工程优化方法中,随机优化方法——遗传算法(GA),是由美国密歇根大学 J. H. Holland 教授于 1975 年提出来的^[17]。它的突出特点在于遗传算法是一种全局性的优化方法,包含了与生物遗传及进化很相似的步骤,如遗传、变异和选择等,是一种快速且有效的全局优化方法,在多种工程优化问题中得到应用^[18,19]。本文将衍射光栅的耦合波分析方法(RCWA)与遗传优化算法进行有机的结合,解决了多种衍射光栅槽型结构参数的优化问题,使得设计高衍射效率的多种槽型衍射光栅的周期大为缩短。

2 严格的耦合波理论

求解光栅衍射场的矢量理论的一般方法就是求解麦克斯韦基本方程组在入射区域、光栅区域以及透射区域内满足一定电磁场边界条件的解。应用严格的耦合波方法求解任意面型函数的光栅的电磁场衍射边值问题,主要包括三个步骤:

- 1) 将光栅分为许多薄层,所分层数应足够近似光栅实际的面型函数;
- 2) 再将每个光栅薄层内的电磁场通过严格的耦合波方法确定;
- 3) 在不同区域边界面上及光栅薄层之间运用

电磁场边界匹配条件,通过一定的数学方法求得各级衍射波的振幅及衍射效率。

以 TE 偏振入射为例,简单介绍耦合波理论的求解过程。

如图 1 所示一平面波以入射角 θ 入射,则光栅将产生各级反射波及透射波。反射区域及透射区域的介电常数分别为 ϵ_1, ϵ_2 ,光栅区域包含了两种介质的周期分布,光栅周期为 Λ ,其介电常数为周期函数,可将介电常数用傅里叶级数展开:

$$\epsilon(x, z) = \epsilon(x + \Lambda, z) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \epsilon_i(z) \exp\left(j \frac{2\pi i}{\Lambda} x\right), \quad (1)$$

式中 $\epsilon_i(z)$ 为光栅区域内介电常数的第 i 级傅里叶系数;在反射、透射两个区域内的电场分布可以根据瑞利展开式展开;而在光栅区域,需要对光栅进行分层模拟其真实槽型结构。第 n 薄层电场、磁场的切向分量可以表示为空间谐波的傅里叶级数展开:

$$E_{n,2y} = \sum_{i=-\infty}^{\infty} V_{n,i}(z) \exp(-jk_{xi}x), \quad (2)$$

$$H_{n,2x} = -j \sqrt{\epsilon_0/\mu_0} \sum_{i=-\infty}^{\infty} U_{n,i}(z) \exp(-jk_{xi}x), \quad (3)$$

式中 $U_{n,i}(z), V_{n,i}(z)$ 分别为第 n 层第 i 级磁场、电场空间谐波的振幅;同时,在第 n 层光栅区域,电磁场必须满足麦克斯韦基本方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial E_{n,2y}}{\partial z} = j\omega \mu_0 H_{n,2x} \\ \frac{\partial H_{n,2x}}{\partial z} = j\omega \epsilon_0 \epsilon_n(x) E_{n,2y} + \frac{\partial H_{n,2z}}{\partial x} \\ \frac{\partial E_{n,2y}}{\partial x} = -j\omega \mu_0 H_{n,2z} \end{cases} \quad (4)$$

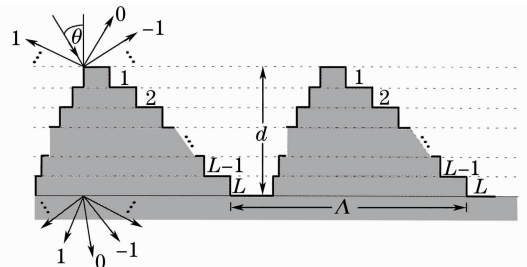


图 1 光栅结构示意图

Fig. 1 Sketch map of a delaminating grating
将(2),(3)式代入(4)式,经过一系列数学推导,得到第 n 层光栅区域的一组耦合波方程:

$$\frac{\partial^2 V_{n,i}}{\partial z^2} = k_{xi} V_{n,i} - k_0^2 \sum_{m=-\infty}^{\infty} \epsilon_{n,i-m} V_{n,m}. \quad (5)$$

根据入射区与光栅区、光栅区与透射区的边界条件,通过求解耦合波方程,就可以得到反射波振幅系数

R 、透射波的振幅系数 T 。则反射区及透射区的各级衍射波的衍射效率 η_r, η_t 分别为

$$\eta_r = |R_i|^2 \operatorname{Re}[k_{1zi}/(k_0 \epsilon_1^{1/2} \cos \theta)], \quad (6)$$

$$\eta_t = |T_i|^2 \operatorname{Re}[k_{3zi}/(k_0 \epsilon_1^{1/2} \cos \theta)]. \quad (7)$$

为真实模拟光栅槽型的形状,光栅区域分层数目要求足够多,这样计算时间将会很长,可以采用透射矩阵方法^[8]辅以一定的数学变换可以用来提高计算效率,同时避免了出现数值不稳定问题出现。

3 全局工程优化算法——遗传算法

遗传算法是一种借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的随机搜索算法,它的突出特点在于包含了与生物遗传及进化很相似的步骤,如遗传、变异和选择等^[20]。经过一代一代地不断繁衍进化,最后收敛到一个最适应环境的群体,从而求得问题的最优解。遗传算法与传统的优化算法相比,具有全局寻优性、算法并行性等特点。遗传算法的主要运算过程

如下:

- 1) 对问题的解空间进行编码,形成基因链群体,即创建初始群体;
- 2) 选择适应度函数;
- 3) 执行遗传算子(选择、遗传和变异),产生新的基因群体;
- 4) 判断是否满足计算要求,若不满足,返回 3)。

3.1 多种槽型衍射光栅的数学模型

在利用遗传算法进行光栅的优化设计时,首先需要针对不同的光栅槽型建立相应的数学模型。讨论了常见光栅槽型的优化设计,如矩形、正弦、三角形和锯齿形光栅,此外还讨论了双闪耀光栅的优化设计。建立光栅数学模型的原则是综合考虑各个变量对适应函数的影响,尽量减少变量的个数,以提高遗传算法的计算效率。在下面的模型中, p 为周期, d 为槽深。

1) 矩形槽型

$$f(x, p, d, t) = \begin{cases} 0; & [0 \leq x < p(1-t)/2] \\ d; & [p(1-t)/2 \leq x < p(1+t)/2], \\ 0; & [p(1+t)/2 \leq x \leq p] \end{cases}, \quad (8)$$

式中 t 为占空比; 该函数描述为三段式的对称结构,实验表明使用该对称结构计算效率更高。

2) 三角槽型

$$f(x, p, d, t) = \begin{cases} k_1 x; & (0 \leq x < pt) \\ k_2 (x - p); & (pt \leq x \leq p) \end{cases}, \quad (9)$$

式中 t 为顶点位置, $t = a/p, k_1 = d/(tp), k_2 = d/(tp - p)$, 结构参数如图 2(a) 所示。

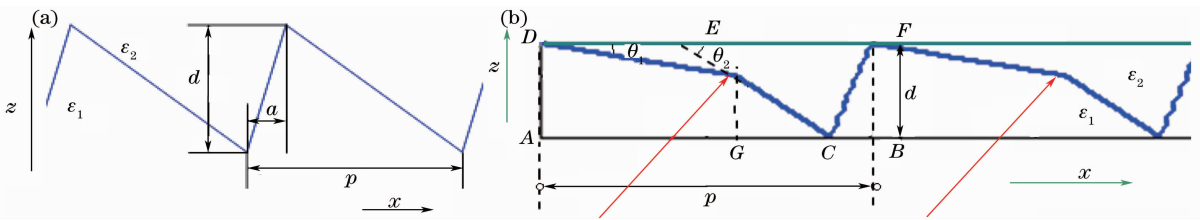


图 2 光栅结构参数示意图。(a)三角槽型;(b)双闪耀槽型

Fig. 2 Structural parameters of gratings. (a) triangle grating; (b) double-blazed grating

3) 正弦槽型

$$f(x, p, d) = \frac{d}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{p}x\right); \quad (0 \leq x \leq p). \quad (10)$$

4) 锯齿槽型

$$f(x, p, d) = \frac{d}{p}x; \quad (0 \leq x \leq p). \quad (11)$$

5) 双闪耀光栅

$$f(x, p, d, t) = \begin{cases} -\tan \theta_1 x + d & (x \text{ between } AG) \\ -\tan \theta_2 (x - pt) + (d - pt \tan \theta_1) & (x \text{ between } GC), \\ \frac{d \tan \theta_2}{p \tan \theta_2 - d - pt (\tan \theta_2 - \tan \theta_1)} \left[x - \frac{d + pt (\tan \theta_2 - \tan \theta_1)}{\tan \theta_2} \right] & (x \text{ between } CB) \end{cases}, \quad (12)$$

式中 θ_1 为第一闪耀角, θ_2 为第二闪耀角, $t = \frac{DE}{DF} = \frac{DE}{p}$ (折点位置 E 在一个周期中的比例位置), 结构参数如图 2(b) 所示。

3.2 遗传算法决策变量

对应衍射光栅的优化设计, 遗传算法的决策变量即为需要优化的衍射光栅结构参数等。对于非锥面衍射(即入射波面法向垂直与光栅刻槽)且入射角固定的情况, 优化参数分别选取为

- 1) 矩形槽型光栅: 周期 p 、槽深 d 和占空比 t ;
- 2) 三角槽型光栅: 周期 p 、槽深 d 和顶点位置 t ;
- 3) 正弦槽型与锯齿槽型: 周期 p 、槽深 d ;
- 4) 双闪耀光栅: 周期 p 、槽深 d 、闪耀角 1、闪耀角 2、折点位置;

倘若是锥面衍射或入射角不固定, 入射角 θ 与方位角 φ 也应选取为决策变量。

3.3 目标函数的确定

在应用遗传算法进行光栅槽型的优化设计中, 选择光栅的衍射效率作为目标函数, 即遗传算法的适应函数: TE 偏振 $\eta_{TE(\text{var})}$; TM 偏振 $\eta_{TM(\text{var})}$ 。

3.4 严格的耦合波理论结合遗传算法优化衍射光栅的结构参数

将严格的耦合波理论与遗传算法相结合, 对衍射光栅的结构参数进行优化设计, 具体实施过程如下:

- 1) 通过某种随机方法产生初始群体, 即一系列的光栅设计初始方案;
- 2) 通过遗传、变异、选择等对初始群体的基因链进行遗传操作;
- 3) 对经过遗传操作的群体基因链进行解码, 即得到相应于每一个基因链的一组光栅结构参数;
- 4) 应用严格的耦合波理论对群体内的每一种光栅进行衍射效率的分析计算, 并按衍射效率的大小进行排序; 选择衍射效率较高的光栅结构作为新一代的群体;
- 5) 从步骤 2) 到步骤 4) 即完成了群体的一代进化, 根据进化的结果是否满足目标函数的要求, 决定是返回步骤 2) 或者结束优化过程。

由于在每一代的遗传过程中, 优良的基因通过遗传操作遗传到下一代; 通过变异改善基因的信息; 通过选择使较好的基因链能够遗传到下一代, 并且其遗传的过程是多方向性的。这样经过多代的遗传

进化, 能够使群体的适应函数获得最优值。优化软件实现的流程图如图 3 所示。在优化的过程中, 群体的大小、遗传的代数均对优化的结果有影响, 过大会造成优化效率的降低。

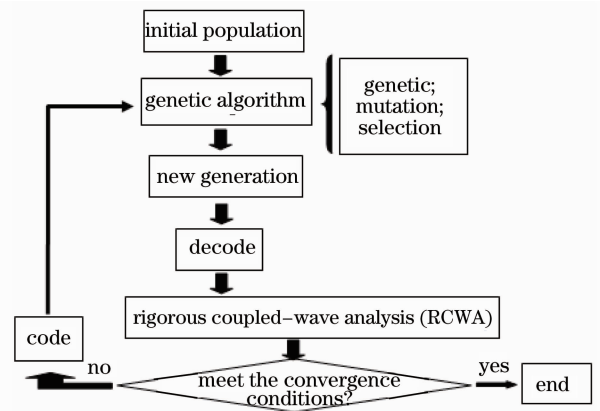


图 3 遗传算法与耦合波方法相结合优化光栅结构参数流程图

Fig. 3 Grating parameter optimization flow chart of combining GA with RCWA

4 优化结果

用 Matlab 语言开发了基于遗传算法的衍射光栅优化设计分析软件, 可以对多种槽型结构的光栅进行优化设计。根据遗传算法的优化原理, 在光栅的优化设计过程中, 对初始设计方案没有特殊的要求, 这样就极大地简化了光栅的设计过程。表 1 和表 2 给出了几种常见槽型光栅的优化结果, 由于优化前的光栅初始结构参数是任意给定的, 因此衍射效率非常低, 经过全局优化后, 衍射效率大幅度提高。

4.1 各向同性介质光栅(透射型)

如表 1 所示。

4.2 金属光栅(反射光栅)

如表 2 所示。

4.3 双闪耀光栅结构参数优化

在光谱仪器中, 尤其是红外分光光度计中, 要求光栅的光谱范围宽, 由于光栅的使用波段有限, 往往一台仪器要配 2 块, 甚至多达 6, 7 块光栅, 导致仪器结构复杂, 成本高。要实现光栅使用波段的展宽可以采用“双闪耀”的方式, 如图 2(b) 所示。双闪耀光栅存在 2 个定向面, 设计难点在于确定这 2 个闪耀面的宽度比例, 从而在整个波段都能获得较高的衍射效率。表 3 给出了优化前后的双闪耀光栅的结构参数, 图 4 给出了双闪耀光栅的优化结果。

表 1 各向同性介质光栅的优化结果 $\epsilon_1=1; \epsilon_2=2.5; \theta=30^\circ$

Table 1 Optimized results of homogeneous dielectric grating $\epsilon_1=1; \epsilon_2=2.5; \theta=30^\circ$

		Divided layers	Diffraction level	p/λ	d/λ	t	η
Rectangle (dielectric)	TE before optimization	1	± 20	1	1	0.5	0.6830
	TE after optimization	1	± 20	0.9598	1.2443	0.5891	0.9678
	TM before optimization	1	± 20	1	1	0.5	0.6519
	TM after optimization	1	± 20	0.9623	1.8969	0.3218	0.9691
Triangle (dielectric)	TE before optimization	30	± 15	1	1	0.5	0.4350
	TE after optimization	30	± 15	1.0946	2.1400	0.4185	0.9890
	TM before optimization	30	± 15	1	1	0.5	0.3036
	TM after optimization	30	± 15	0.9752	2.7875	0.5211	0.9980
Sine (dielectric)	TE before optimization	30	± 15	1	1		0.5684
	TE after optimization	30	± 15	0.9605	1.6938		0.9808
	TM before optimization	30	± 15	1	1		0.4362
	TM after optimization	30	± 15	1.0111	2.1547		0.9856
Sawtooth (dielectric)	TE before optimization	30	± 15	1	1		0.1817
	TE after optimization	30	± 15	0.6938;	1.6874		0.9875
	TM before optimization	30	± 15	1	1		0.2063
	TM after optimization	30	± 15	0.8128	3.3189		0.9916

表 2 金属光栅的优化结果 $\epsilon_1=1; \epsilon_2=(0.220-j6.710)^2; \theta=30^\circ$

Table 2 Optimized results of metal grating $\epsilon_1=1; \epsilon_2=(0.220-j6.710)^2; \theta=30^\circ$

		Divided layers	Diffraction level	p/λ	d/λ	t	η
Rectangle (metal)	TE before optimization	1	± 20	1	1	0.5	0.4928
	TE after optimization	1	± 20	1.1804	1.0873	0.5792	0.9500
	TM before optimization	1	± 20	1	1	0.5	0.0979
	TM after optimization	1	± 20	0.8939	0.6910	0.6104	0.9366
Triangle (metal)	TE before optimization	30	± 15	1	1	0.5	0.6579
	TE after optimization	30	± 15	0.9896	0.7875	0.8831	0.9756
	TM before optimization	30	± 15	1	1	0.5	0.0675
	TM after optimization	30	± 15	0.7563	0.3812	0.8519	0.8969
Sine (metal)	TE before optimization	30	± 15	1	1		0.4603
	TE after optimization	30	± 15	0.9984	0.6430		0.9724
	TM before optimization	30	± 15	1	1		0.2409
	TM after optimization	30	± 15	0.7953	0.2948		0.9366
Sawtooth (metal)	TE before optimization	30	± 15	1	1		0.8278
	TE after optimization	30	± 15	1.0844	3.2270		0.9203
	TM before optimization	30	± 15	1	1		0.3583
	TM after optimization	30	± 15	0.8969	0.3100		0.9151

表 3 双闪耀光栅优化前后的结构参数 $\epsilon_1=1; \epsilon_2=(11.500-j67.500)^2$

Table 3 Structural parameters of double-blazed gratings before and after optimization $\epsilon_1=1; \epsilon_2=(11.500-j67.500)^2$

	Rule density (l/mm)	Divided layers	Diffraction level	$d/\mu\text{m}$	$p/\mu\text{m}$	Angle1 /($^\circ$)	Angle2 /($^\circ$)	Angle changed position
Before optimization	90.9	30	± 15	2.5	11	16	73	0.25
After optimization	90.9	30	± 15	3.6	11	20	27	0.45

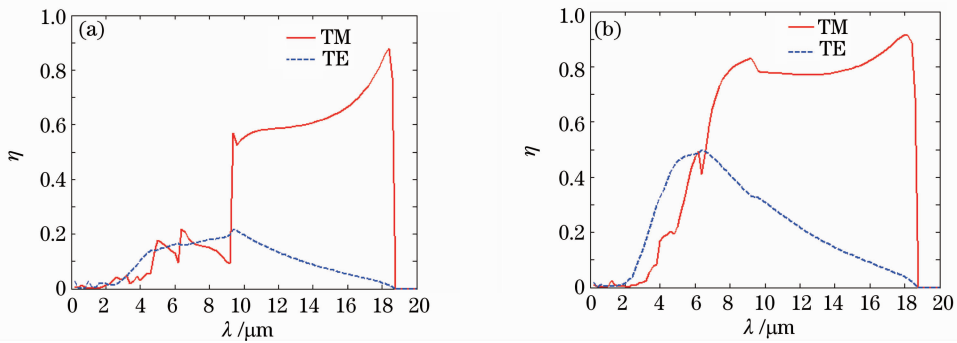


图 4 双闪耀光栅优化结果。(a)优化前;(b)优化后

Fig. 4 Optimized results of double-blazed grating. (a) before optimized; (b) after optimized

从图中可以看到,经过优化之后,出现了明显的双闪耀峰,同时在整个波段的衍射效率得到了显著的提高。

5 结 论

将衍射光栅的矢量分析理论与全局工程优化算法相结合,建立了一套完整的多种槽型衍射光栅结构参数优化设计的通用方法。优化结果表明了该方法的有效性,通过对槽型参数的合理约束可以快速得到最佳结构设计参数,可对光栅的实际设计工作提供指导。该方法从理论上可以解决任意槽型、任意参数范围、任意方位入射的光栅结构参数的优化设计,大大简化了光栅设计过程。对于亟待解决的光栅逆向设计问题,该方法也显示出很高的可行性,今后将对问题进行进一步的研究。

致谢 感谢国家科技支撑计划:高分辨分光器件及接收部件(器件)的研制与开发(2006BAK03A02)对本研究的支持。

参 考 文 献

- Zhang Liang, Li Chengfang, Liu Wen *et al.*. Development of broadband polarizing beam splitter/combiner [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1048~1052
张亮,李承芳,刘文等.一种亚波长偏振分波/合波器的研制[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1048~1052
- Chen Yongli, Zhao Dazun, Zhang Jingfang *et al.*. Non-contact cascaded dual-layer sub-wavelength gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1031~1036
陈永利,赵达尊,张静方等.间隔叠合式双层亚波长光栅[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1031~1036
- Li Yigui, Chen Di. Sub-wavelength gratings based on a new microfabrication technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 1008~1010
李以贵,陈迪.基于一种新微细加工技术的亚波长光栅的研制[J]. *光学学报*, 2002, **22**(8): 1008~1010
- Guo Jianqiang. Theory analysis of array waveguide grid based on Si-slab [J]. *Laser Technology*, 2007, **31**(6): 620~623

- 郭建强.基于硅的阵列波导光栅的理论分析[J]. *激光技术*, 2007, **31**(6): 620~623
- Zuo Yanlei, Wei Xiaofeng, Zhu Qihua *et al.*. Far field analysis after chirped pulse passing through a misalignment tiled-grating compressor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7): 922~927
左言磊,魏晓峰,朱启华等.啁啾脉冲通过失调拼接光栅压缩池后的远场分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(7): 922~927
- D. Maystre. A new general theory for dielectric coated gratings [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1978, **68**(4): 490~495
- J. Chandezon, D. Maystre, G. Raoult. A new theoretical method for diffraction gratings and its numerical application [J]. *J. Opt.*, 1980, **11**(4): 235~241
- M. G. Moharam, T. K. Gaylord. Diffraction analysis of dielectric surface-relief gratings [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(10): 1385~1392
- M. G. Moharam, D. A. Pommet, E. B. Grann. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1995, **12**(5): 1077~1086
- M. G. Moharam, E. B. Grann, D. A. Pommet *et al.*. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(5): 1068~1076
- Zhang Liang, Li Chengfang, Zhang Fei. Diffractive characteristics of 1D metal gratings with subwavelength periodic structure [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6): 805~808
张亮,李承芳,张飞.一维金属亚波长周期光栅的衍射特性[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 805~808
- Kong Weijin, Yun Maojin. Diffraction property of multi-layer dielectric grating with trapezium groove [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1415~1419
孔伟金,云茂金.梯形介质膜光栅衍射特性分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1415~1419
- Fan Shuwei, Zhou Qinghua. Analysis of diffraction characteristics of blazed gratings [J]. *Laser Technology*, 2010, **34**(1): 41~44
樊叔维,周庆华.闪耀光栅的衍射特性研究[J]. *激光技术*, 2010, **34**(1): 41~44
- Kong Weijin, Yun Maojin. Diffraction property of multi-layer dielectric gratings studied by rigorous coupled-wave analysis [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(8): 4904~4907
孔伟金,云茂金.基于严格耦合波理论的多层介质膜光栅衍射特性分析[J]. *物理学报*, 2008, **57**(8): 4904~4907
- A. Roger, D. Maystre. Inverse scattering method in electromagnetic optics: application to diffraction gratings [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1980, **70**(12): 1483~1495
- Ilkka Kallioniemi, Thomas Ammer *et al.*. Optimization of continuous-profile blazed gratings using rigorous diffraction

- theory[J]. *Opt. Commun.*, 2000, **177**(1-6): 15~24
- 17 J. H. Holland. *Adaptation in Nature and Artificial systems* [M]. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975
- 18 Zeng Ming, Li Jianxun. Optimized design of morphological improved top-hat filter based on improved genetic algorithms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 510~515
曾明, 李建勋. 基于改进遗传算法优化的形态学修正 TOP-HAT 滤波器设计方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4): 510~515
- 19 He Yuntao, Jiang Yuesong. Optical synthesis aperture circle array optimization based on genetic algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1611~1616
何云涛, 江月松. 基于遗传算法的光综合孔径圆周阵优化[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1611~1616
- 20 E. Goldberg. *Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning* [M]. New York: Assion-Wesley Publishing Company, 1987