

# 基于亚波长金属介质膜光栅的宽光谱消色差相位延迟器

李 娜, 孔伟金, 季淑英, 司 维, 徐志恒, 车卫康, 云茂金

青岛大学物理科学学院, 山东 青岛 266071

**摘要** 消色差相位延迟器可以在较宽光谱范围内获得所需要的相位延迟量,是偏振光调制的核心元件之一。根据严格耦合波理论和遗传算法,提出了一种基于夹层式亚波长金属介质膜光栅的宽光谱消色差相位延迟器的设计方法,并设计了一种在 900~1200 nm 波长范围内实现消色差的相位延迟器,其相位延迟量在 90°左右的最大偏差小于 2.3%,且横电波和横磁波的衍射效率均高于 90%。数值分析表明,所设计的消色差相位延迟器对槽深和入射角具有较大的工艺容差。该消色差相位延迟器设计简单,性能稳定,具有重要的应用价值。

**关键词** 光栅; 亚波长光栅; 消色差相位延迟器; 严格耦合波理论; 遗传算法; 衍射

中图分类号 O436.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0205001

## Broadband Achromatic Phase Retarder Based on Subwavelength Metal Dielectric Gratings

Li Na, Kong Weijin, Ji Shuying, Si Wei, Xu Zhiheng, Che Weikang, Yun Maojin

College of Physics, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China

**Abstract** An achromatic phase retarder can obtain the desired phase retardation in a wide spectral range, and it is one of the core elements used in polarization light modulation. A design method for broadband achromatic phase retarder is proposed based on sandwich-type subwavelength metal dielectric gratings according to the rigorous coupled wave theory and the genetic algorithm. A phase retarder which can achieve achromatism is designed in the wavelength range of 900~1200 nm. The maximum deviation of phase retardation around 90° is less than 2.3%, and the diffraction efficiencies of transverse electric wave and transverse magnetic wave are both higher than 90%. The numerical analysis shows that the designed achromatic phase retarder has a large manufacture tolerance for groove depth and incidence angle. The achromatic phase retarder is simple in design, stable in performance and has an important application value.

**Key words** gratings; subwavelength grating; achromatic phase retarder; rigorous coupled wave theory; genetic algorithm; diffraction

**OCIS codes** 050.2770; 050.6624; 050.1940; 050.1950

## 1 引 言

相位延迟器是光学系统中的常用元件之一,根据相位延迟量的不同可分为 1/4 波片、1/2 波片和全波片等。传统相位延迟器的制作通常采用具有双折射特性的晶体<sup>[1]</sup>、多层介质膜或液晶<sup>[2]</sup>。消色差相位延迟器大大削弱了相位延迟量对波长的依赖关系,可以在宽光谱范围内实现对偏振光的调制。消色差相位延迟器通常有复合波片<sup>[3]</sup>、多层介质薄膜<sup>[4]</sup>和光栅<sup>[5]</sup>三种形式。复合波片有二元复合波片和三元复合波片两种,复合波片形式的消色差相位延迟器对角度调节的要求比较高。多层介质薄膜形式的消色差相位延迟器通常由多层薄膜交替沉积而成,膜层结构相对复杂。采用传统光栅制作的相位延迟器需要精密控制介质膜层的厚

收稿日期: 2016-08-31; 收到修改稿日期: 2016-09-23

基金项目: 国家自然科学基金(11274188)

作者简介: 李 娜(1990—),女,硕士研究生,主要从事衍射光学方面的研究。E-mail: linaqd90@163.com

导师简介: 孔伟金(1976—),男,博士,教授,主要从事光栅衍射特性方面的研究。E-mail: kwjdsd@163.com(通信联系人)

度,而且膜层厚度对光栅结构的工艺容差较小。

Flanders<sup>[6]</sup>通过 X 射线光刻和反应离子刻蚀在氮化硅上制作了矩形相位 1/4 波片光栅,其在波长 632.8 nm 处的相位延迟量为 95.7°;Enger 等<sup>[7-8]</sup>利用全息方法制作了正弦型 1/4 波片光栅;赵华君<sup>[5]</sup>采用模态法设计了一维矩形石英光栅型相位延迟器,得到波长 532 nm 处的相位延迟量为 90.2°;上述研究均处于静态光栅区域(即光栅周期  $\Lambda \ll \lambda$ ),相位延迟的色散严重,只能用于单波长系统。在消色差相位延迟器的研究中,Bokor 等<sup>[9]</sup>采用等效折射率理论,设计了波长在 470~630 nm 范围内的斜入射光栅消色差 1/4 相位延迟器,得到的相位延迟量为  $90^\circ \pm 0.85^\circ$ ;伊德尔等<sup>[10]</sup>采用熔融石英设计了亚波长光栅消色散相位延迟器,针对 400~800 nm 可见光范围内的三个波长复合消色散波片进行设计,最大偏差为 9%,衍射效率高于 60%。

亚波长金属介质膜光栅具有高透射率、宽光谱、较好的偏振性等优点,是一种性能优良的光学元件<sup>[11]</sup>。本文针对红外波段设计了一种基于夹层式亚波长介质膜光栅的消色差相位延迟器,系统地分析了光栅参数对消色差相位延迟器性能的影响。在 900~1200 nm 波长范围内,所设计的消色差相位延迟器的相位延迟量在 90°左右的最大偏差小于 2.3%。

## 2 理论模型

### 2.1 消色差相位延迟器的衍射效率

光栅的理论研究是设计光栅结构和准确预见光栅衍射特性的有效手段之一。当光栅周期小于或接近入射光波长时,标量分析已经不再适用,同时,光栅的衍射效率、相位以及偏振态随光栅结构参数的变化非常明显。由 Moharam 和 Gaylord 提出的严格耦合波分析(RCWA)方法被广泛应用于光栅衍射特性的分析和光栅的设计中,RCWA 实际上就是对电磁波 Maxwell 方程组的准确求解<sup>[12-13]</sup>,利用 RCWA 可获得收敛稳定的最优解。

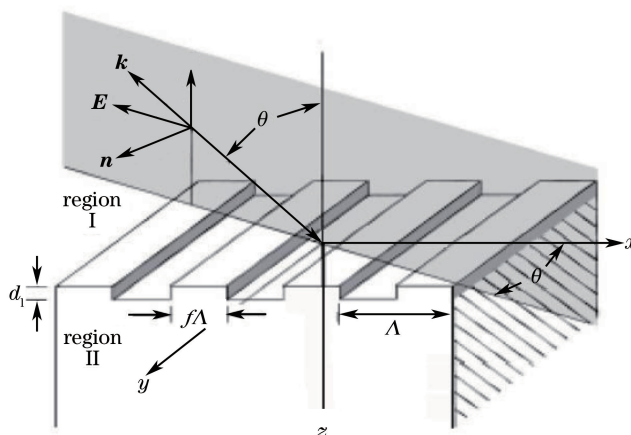


图 1 TE 波入射的矩形光栅结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rectangular grating structure with incident light in TE mode

光栅的结构示意图如图 1 所示,图中  $\mathbf{k}$  为波矢, $\theta$  为入射角, $f$  为光栅的占空比, $\Lambda$  为光栅周期, $d_1$  为光栅槽深, $\mathbf{n}$  代表法向量, $\mathbf{E}$  代表入射波的电场矢量。将光栅结构分为入射区、光栅调制区以及透射区三部分。以横电波(TE 波)为例[横磁波(TM 波)可由以下方法类推得],对于光栅区,归一化的电场和磁场可表示为

$$\begin{cases} E_{l,gy} = \sum_i S_{l,yi}(z) \exp(-j\mathbf{k}_{xi}x) \\ H_{l,gx} = -j(\epsilon_0/\mu_0) 1/2 \sum_i U_{l,xi}(z) \exp(-j\mathbf{k}_{xi}x) \end{cases}, \quad (1)$$

式中  $S_{l,yi}(z)$  和  $U_{l,xi}(z)$  分别为光栅区的第  $i$  级衍射波的归一化振幅, $\epsilon_0$  为自由空间的介电常数, $\mu_0$  为自由空间的磁导率, $\mathbf{k}_{xi}$  为每一层  $x$  方向的波矢量。

微分方程的通解可表示为

$$\begin{cases} S_{l,y}(z) = \sum_{m=1}^n \omega_{l,i,m} \{B_l \exp[\mathbf{k}_0 q_{l,m}(z - D_l)] + A_l \exp[-\mathbf{k}_0 q_{l,m}(z - D_l + d_1)]\} \\ U_{l,x}(z) = \sum_{m=1}^n v_{l,i,m} \{B_l \exp[\mathbf{k}_0 q_{l,m}(z - D_l)] - A_l \exp[-\mathbf{k}_0 q_{l,m}(z - D_l + d_1)]\} \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $\omega_{l,i,m}$  为矩阵的本征矢量元素;  $q_{l,m}$  为矩阵本征值的正平方根; 构建矩阵  $\mathbf{V}_l = \mathbf{W}_l \mathbf{Q}_l$ , 其矩阵元为  $v_{l,i,m}$ ;  $d_1$  为光栅的槽深;  $D_l$  为光栅的槽深和多层介质膜厚度之和;  $A_l$  和  $B_l$  为由边界条件确定的未知系数。

将上述解代入各层间电磁场的切向连续条件中, 递推得到反射衍射波振幅系数  $R_i$ , 再求出反射衍射效率, 即

$$\eta_{Ri} = R_i R_i^* \operatorname{Re}(\mathbf{k}_{l,zi} / \mathbf{k}_0 n_i \cos \theta), \quad (3)$$

式中  $\mathbf{k}_{l,zi}$  为入射区衍射光的  $z$  分量,  $\mathbf{k}_0$  为入射光波矢量,  $n_i$  为入射区的折射率,  $\operatorname{Re}$  代表求实部运算,  $R_i^*$  为  $R_i$  的共轭。

### 2.2 消色差相位延迟器的相位延迟量

基于严格耦合波理论求解相位, 即利用其衍射振幅系数计算 TE 波和 TM 波的相位:

$$\varphi_{\text{TE}} = \arctan(R_{\text{TE}}), \quad \varphi_{\text{TM}} = \arctan(R_{\text{TM}}), \quad (4)$$

式中  $R_{\text{TE}}$ 、 $R_{\text{TM}}$  分别为 TE 波和 TM 波的 0 级反射衍射波的振幅系数。0 级 TE 波和 TM 波的相位差为

$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{TE}} - \varphi_{\text{TM}}. \quad (5)$$

## 3 优化设计

介质膜用来获得高的反射率, 浮雕结构用来调制光的衍射<sup>[14]</sup>。金属光栅结构如图 2 所示, 其中  $d_{\text{SiO}_2}$  为覆盖膜层二氧化硅( $\text{SiO}_2$ ) 的厚度,  $D$  为光栅的槽深,  $t_r$  为光栅的剩余厚度,  $\lambda$  为入射波长,  $t_r$  为光栅的剩余厚度。

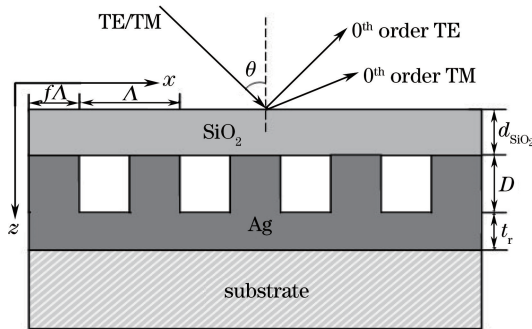


图 2 金属光栅结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of metallic grating

光栅材料的选择会影响光栅的光学性能, 通过比较发现铝、铬、银(Ag)三种金属的特性曲线有一定规律<sup>[15]</sup>, 该结构选用金属银作为刻蚀光栅层, 金属的色散特性采用 Drude 模型描述<sup>[16]</sup>, 银在 900~1200 nm 波段范围内的折射率色散比较小<sup>[17]</sup>, 因此, 在选定波段范围内银的折射率  $n = 0.2309 - 7.1452i$ , 所设计的光栅结构包含金属的剩余厚度<sup>[18]</sup>, 可以提高光的反射率并降低光栅的制备难度。覆盖层为折射率为 1.46 的  $\text{SiO}_2$  薄膜, 该薄膜对光栅的衍射具有较大的调制作用, 计算表明,  $\text{SiO}_2$  膜层的折射率色散对设计结果影响较小, 可以忽略<sup>[10]</sup>。

该设计的目标是 TE 波和 TM 波在以 1053nm 为中心波长的 900~1200nm 波段范围内实现 0 级反射消色差 1/4 波片的相位延迟量( $\Delta\varphi$ )<sup>[19]</sup>, 即  $\Delta\varphi = 90^\circ$ 。通过优化光栅的表面浮雕结构和介质膜的厚度来获得较小的相位延迟以及较高的衍射效率, 并得到全局最优化设计结果。基于 RCWA 和遗传算法, 定义以  $90^\circ$  差值的绝对值为优化目标函数, 即

$$X_{\text{RMS}} = |90 - \Delta\varphi|, \quad (6)$$

式中  $X_{\text{RMS}}$  为最佳适应度, 其值越小, 代表相位差越接近  $90^\circ$ , 所设计的光栅性能越优良。

遗传算法<sup>[20]</sup>是通过模拟自然进化规律现象来获得最优解的方法, 通过设定适应度函数的目标函数, 可

增强全局寻优能力,减小陷入局部最优化的可能性,因此采用遗传算法进行全局寻优。

## 4 结果分析

### 4.1 中心波长为 1053 nm 的光栅参数的优化结果

为实现设计目标,使该结构的相位延迟量在  $90^\circ$  左右,建立  $1/4$  相位延迟器的结构性能评价函数<sup>[21]</sup>,选定波长范围为  $900\sim 1200$  nm,对光栅结构的周期、占空比、槽深等参数进行优化,结果如表 1 所示。

表 1 光栅结构参数

Table 1 Parameters of grating structure

$d_{\text{SiO}_2}/\text{nm}$	$D/\text{nm}$	$t_r/\text{nm}$	$f$	$\Delta/\text{nm}$	$\theta/(\circ)$	$\lambda/\text{nm}$
154.2	139.7	65	0.14	68	29	$900\sim 1200$

根据表 1 中的光栅结构参数,绘制出 TE 波与 TM 波的相位差随波长的变化关系曲线,如图 3 所示。由图 3 可知,0 级 TE 波和 TM 波的相位差在波长范围为  $900\sim 1200$  nm 内的变化范围分别为  $80^\circ\sim 100^\circ$  和  $88^\circ\sim 92^\circ$ ;在选定的波长范围内,该光栅结构的相位延迟量在  $90^\circ$  左右,上下差值为  $2^\circ$ 。在这种结构中,由于金属具有较强的吸收特性,很难获得较高的透射衍射效率<sup>[22]</sup>,为使两种偏振模式下的光具有较高的衍射效率,采用反射光的衍射效率,其随波长的变化曲线如图 4 所示,代表 0 级 TE 波和 TM 波的衍射效率在波长范围为  $900\sim 1200$  nm 内的变化范围分别为  $0\sim 100\%$  和  $90\%\sim 95\%$ 。从图 4 中可以看出,TE 波和 TM 波的反射衍射效率均高于  $90\%$ 。

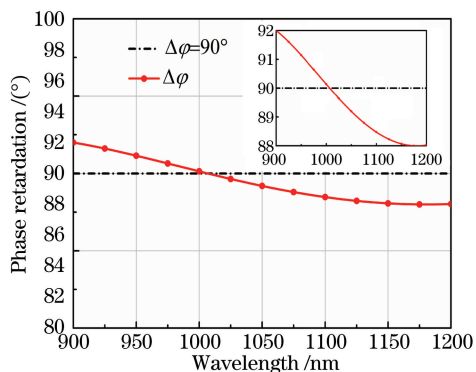


图 3 TE 波与 TM 波的相位差随波长的变化  
Fig. 3 Variations of phase difference with wavelength of TE wave and TM wave

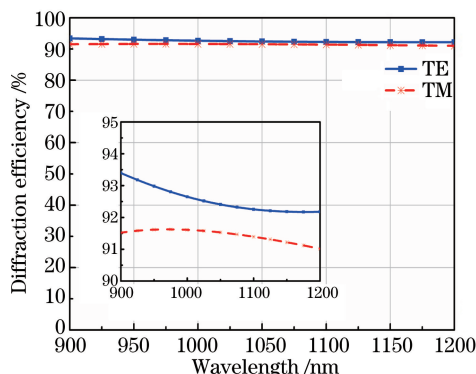


图 4 TE 波与 TM 波的衍射效率随波长的变化  
Fig. 4 Variations of diffraction efficiency with wavelength of TE wave and TM wave

### 4.2 工艺容差分析

由于微加工过程中存在误差,光栅槽深和入射角度等参数的微小变化都会引起光栅相位延迟量的偏移<sup>[21]</sup>,并且很难精准控制角度。因此,需要对所设计的光栅进行工艺容差分析。在分析过程中,将光栅结构

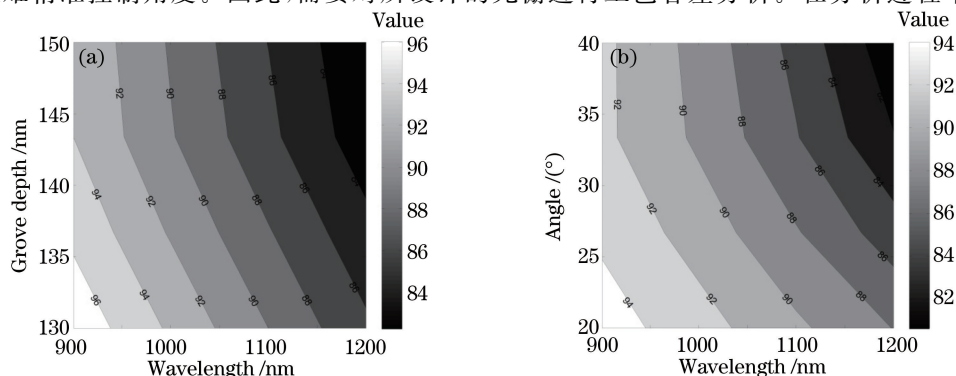


图 5 (a) 相位差随波长和槽深的变化; (b) 相位差随波长和入射角的变化

Fig. 5 (a) Variation of phase retardation with wavelength and groove depth; (b) Variation of phase retardation with wavelength and incidence angle

参数设定一个范围,观察此范围内光栅相位延迟量随参数的变化规律,从而判断光栅参数是否满足工艺生产的要求。图 5 为相位差随波长与槽深和入射角度的等高变化图。其中不同颜色的区域表示为:横坐标代表入射波长的变化范围,纵坐标分别代表槽深和入射角度的变化范围。图 5(a)为 0 级 TE 波与 TM 波的相位差随入射波长和槽深的变化图,从图中可以看出,当入射波长范围为 900~1200 nm 时,槽深为 130~150 nm,相位延迟量为  $90^\circ \pm 2^\circ$ 。图 5(b)为相位差随光栅波长和入射角的变化,当入射角范围为  $20^\circ \sim 40^\circ$  时,波长在选定范围之间变化,相位延迟量最大偏差小于  $2^\circ$ ,表明这种消色差光栅结构对槽深和入射角有较大的工艺容差,适合工艺上的生产制备。

## 5 结 论

基于亚波长光栅的严格耦合波理论和遗传算法,设计了一种夹层式亚波长金属介质膜光栅结构,通过数值模拟和优化设计,对 900~1200 nm 波长范围内的 TE 波与 TM 波的消色差  $\lambda/4$  波片相位延迟特性进行了研究,并对其工艺容差进行了分析。结果表明,所设计的光栅结构的相位延迟量具有较大的工艺容差,性能上满足光学领域对相位延迟器的要求。该研究对设计和制备亚波长金属介质膜光栅的消色差相位延迟器具有重要的意义。

## 参 考 文 献

- [1] Veiras F E, Raffa G, Caré D, *et al.* Novel achromatic single reflection quarter-wave retarder: Design and measurement [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(3): 033109.
- [2] Vargas A, Maria S L, Garcia-Martinez P, *et al.* Highly accurate spectral retardance characterization of a liquid crystal retarder including Fabry-Perot interference effects [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 115(3): 033101.
- [3] Yun Maojin, Li Guohua, Wang Mei, *et al.* Three-in-one composite achromatic  $\lambda/4$  wave-plate [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2001, 12(6): 562-564.  
云茂金, 李国华, 王 美, 等. 三元复合式消色差  $\lambda/4$  波片 [J]. *光电子 • 激光*, 2001, 12(6): 562-564.
- [4] Li Xing, Huang Jianbing, Wei Chaoyang, *et al.* Metal-dielectric multilayer coating design achieving broadband and high-reflectance and  $270^\circ$  phase retardation [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(12): 3133-3139.  
李 星, 黄建兵, 魏朝阳, 等. 金属介质组合  $270^\circ$  反射式宽带相位延迟膜设计 [J]. *中国激光*, 2010, 37(12): 3133-3139.
- [5] Zhao Huajun. The phase retarder design with gratings using modal method [J]. *Laser Journal*, 2015, 36(8): 101-104.  
赵华君. 模态法设计光栅型相位延迟器研究 [J]. *激光杂志*, 2015, 36(8): 101-104.
- [6] Flanders D C. Submicrometer periodicity gratings as artificial anisotropic dielectrics [J]. *Applied Physics Letters*, 1983, 42(6): 492-494.
- [7] Enger R C, Case S K. Optical elements with ultrahigh spatial-frequency surface corrugations [J]. *Applied Optics*, 1983, 22(20): 3220-3228.
- [8] Cescato L H, Gluch E, Streibl N. Holographic quarterwave plates [J]. *Applied Optics*, 1990, 29(22): 3286-3290.
- [9] Bokor N, Shechter R, Davidson N, *et al.* Achromatic phase retarder by slanted illumination of a dielectric grating with period comparable with the wavelength [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(13): 2076-2080.
- [10] Yi De'er, Yan Yingbai, Tan Qiaofeng, *et al.* Study on broadband achromatic quarter-wave plate by subwavelength gratings [J]. *Chinese J Lasers*, 2003, 30(5): 405-408.  
伊德尔, 严瑛白, 谭峭峰, 等. 亚波长光栅用于实现宽光谱消色散  $\lambda/4$  波片的研究 [J]. *中国激光*, 2003, 30(5): 405-408.
- [11] Wang Zhongfei, Zhang Dawei, Wang Qi, *et al.* Development trends of subwavelength metal gratings [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(1): 010002.  
王中飞, 张大伟, 王 琦, 等. 亚波长金属光栅的发展趋势 [J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(1): 010002.
- [12] Moharam M G, Gaylord T K. Rigorous coupled-wave analysis of metallic surface-relief gratings [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1986, 3(11): 1780-1787.
- [13] Moharam M G, Gaylord T K. Coupled-wave analysis of reflection gratings [J]. *Applied Optics*, 1981, 20(2): 240-244.
- [14] Kong Weijin, Wang Shuhao, Wei Shijie, *et al.* Diffraction property of broadband metal multi-layer dielectric gratings based on rigorous coupled-wave analysis [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(11): 356-362.

- 孔伟金, 王书浩, 魏世杰, 等. 基于严格耦合波理论的宽光谱金属介质膜光栅衍射特性分析[J]. 物理学报, 2011, 60(11): 356-362.
- [15] Zhang Na, Chu Jinkui, Zhao Kaichun, *et al.* The design of the subwavelength wire grid polarizers based on rigorous couple wave theory[J]. Chinese Journal Sensors and Actuators, 2006, 19(5): 1739-1743.  
张 娜, 褚金奎, 赵开春, 等. 基于严格耦合波理论的亚波长金属光栅偏振器设计[J]. 传感技术学报, 2006, 19(5): 1739-1743.
- [16] Zhan G, Liang R, Liang H, *et al.* Asymmetric band-pass plasmonic nanodisk filter with mode inhibition and spectrally splitting capabilities[J]. Optics Express, 2014, 22(8): 9912-9919.
- [17] Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu, *et al.* Modern optical thin film technology[M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 2006: 104-106.  
唐晋发, 顾培夫, 刘 旭, 等. 现代光学薄膜技术[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 2006: 104-106.
- [18] Fu Zhengping, Lin Feng, Zhu Xing. Numerical study on the optical absorption of one dimension metallic gratings[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(11): 349-355.  
傅正平, 林 峰, 朱 星. 一维金属光栅的光学反射吸收[J]. 物理学报, 2011, 60(11): 349-355.
- [19] Kong Weijin, Wang Shuhao, Wei Shijie, *et al.* Design and diffraction property of broad waveband high diffraction efficiency grating for chirped pulse compressor[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10): 1005001.  
孔伟金, 王书浩, 魏世杰, 等. 宽光谱高衍射效率脉宽压缩光栅设计和性能分析[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1005001.
- [20] Golberg D E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning [M]. Boston: Addison-Wesley Longman Publishing, 1989.
- [21] Kong Weijin, Cao Kaihua, You Chenglong, *et al.* Optimization of wide spectrum anti-reflective grating for solar cell [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1205001.  
孔伟金, 曹凯华, 由成龙, 等. 太阳能电池用宽光谱减反射光栅的优化设计[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1205001.
- [22] Boyd R D, Britten J A, Decker D E, *et al.* High-efficiency metallic diffraction gratings for laser applications [J]. Applied Optics, 1995, 34(10): 1697-706.