

800 nm 亚波长夹层式金属偏振分束光栅

季淑英,孔伟金,李娜,车卫康,司维,徐志恒

(青岛大学物理科学学院,山东青岛 266071)

摘要: 为获得高性能的偏振分束光栅,设计了一种亚波长夹层式金属光栅结构,通过严格耦合波分析和遗传算法优化出最佳光栅结构。所设计的光栅在波长为 800 nm 时,0 级衍射级次上 TM 偏振波的透射率和 TE 偏振波的反射率分别为 98%和 96.5%。在波长 $747\text{ nm} < \lambda < 854\text{ nm}$,以及入射角 $-27^\circ < \theta < 27^\circ$ 范围内,光栅的透射和反射消光比都大于 20 dB,达到了高衍射效率、高消光比、宽带宽及大角度的要求,数值分析表明该光栅对周期、槽深、覆盖层厚度具有优良的工艺容差。该光栅结构简单,性能稳定,对入射光损耗低,偏振分束效果明显,在光学偏振器件、激光器系统、偏振成像等领域具有广泛的应用前景。

关键词: 亚波长光栅; 严格耦合波分析; 遗传算法; 偏振分束

中图分类号: O436.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0820002

Subwavelength sandwiched metal polarizing beam grating for 800 nm

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

(College of Physics Science, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: In order to obtain high performance of polarization splitting grating, the subwavelength sandwiched metal grating structure was designed and analyzed. The optimal grating parameters were made by using the rigorous couple wave theory and genetic algorithm. Based on the optimized grating structure, high diffraction efficiencies of 98% and 96.5% can be achieved for TM transmission and TE reflection of 0th order in the 800 nm wavelength range, respectively. The optimized grating has an extinction ration of over 20 dB from 747 nm to 854 nm, and a large angle, from -27° to 27° , which met the expectations for high efficiency, high extinction ratio and wide spectrum and large angle. The fabrication tolerance around the optimized grating parameters was discussed, numerical results showed that the designed grating has good manufacture tolerance to period and groove depth and covering layer thickness. The subwavelength metal grating own many good characters such as simple structure, stable performance, low damage for the incident wave and obvious polarization, which will make the subwavelength metal grating have wide application prospect in the fields of optical polarizing elements, laser system, polarization imaging, etc.

Key words: subwavelength grating; rigorous couple wave analysis (RCWA); genetic algorithm; polarizing beam

收稿日期:2016-12-10; 修订日期:2017-01-20

基金项目:国家自然科学基金(11274188)

作者简介:季淑英(1990-),女,硕士生,主要从事微纳光子学方面的研究。Email: 1148418085@qq.com

导师简介:孔伟金(1976-),男,教授,博士,主要从事微纳光子学方面的研究。Email: kwjsd@163.com

0 引言

偏振分束器能够将非偏振光分成两束正交偏振光,并沿着不同的方向传播,是光网络组件中的重要光子调制器件,在光通信、光存储中都有重要的应用价值。随着偏振成像^[1]及全息离子束刻蚀技术^[2]的迅猛发展,具有高消光比、宽光谱、宽视角、高衍射效率的偏振分束器变得越来越重要。亚波长金属光栅具有传统光栅所不具有的特殊性质,其衍射效率与消光比高、光谱宽度宽、偏振性能好,是一种性能优良的光学元件,在亚波长光学偏振器件应用领域中占据重要地位,且由于具有体积小、效率高、易集成等优点,因此在激光器系统、偏振成像、光电探测、薄膜太阳能电池、光学传感等领域具有广泛的应用前景^[3-5]。冷雁冰等^[6]提出了一种 1×11 亚波长结构 Dammann 光栅,其衍射效率大于 95%,但没有对光栅的偏振效果进行考虑。褚金奎等^[7]设计了一种亚波长双层金属光栅,分析了光栅周期和金属厚度对偏振性能的影响,在 510 nm 中心波长处 TM 偏振光的透射率仅高于 71%。Wu 等^[8]提出了一种双周期结构的金属光栅,在 1~3 μm 的波长范围内获得较高的偏振衍射效率,但其工艺制备要求比较严格。Wu 等^[9]设计的非对称的单层硅光栅,在波长 1.53~1.62 μm 和入射角-4°~4°的范围内实现 TM 和 TE 的 0 级偏振分束,而非对称结构光栅的制备工艺复杂,带宽和角度变化范围小。孟凡涛等^[10]研究了不同槽形的含有氟化镁介质膜的亚波长金属铝光栅,得到理想矩形光栅结构的偏振性能最好。赵华君等^[11]设计亚波长金属铝光栅,在入射角-30°~30°和 470~800 nm 波段内实现 TM 高透和 TE 高反,但衍射效率低于 90%,对入射光的损耗大。

为获得结构简单、性能稳定、易于加工的高衍射效率、高消光比的偏振光栅,文中针对 800 nm 光波,提出了一种亚波长夹层式金属光栅结构,系统分析了光栅各结构参数对亚波长金属光栅偏振分束器的影响。所设计的光栅在 0 级衍射级次上对 TM 波高透、对 TE 波高反,在 747~854 nm 波段和-27°~27°入射角范围内,光栅透射和反射消光比都大于 20 dB,文中的研究工作对设计和制备高衍射效率、高消光比、宽带宽、大角度的金属偏振光栅具有一定指导

意义。

1 光栅结构设计

1.1 理论依据

亚波长光栅对于 TE 和 TM 偏振光具有不同的衍射效果,此时标量衍射理论将出现较大误差,采用严格耦合波分析法(RCWA)设计亚波长偏振光栅。严格耦合波方法^[12-13]是一种电磁矢量衍射理论,将入射光分为 TE 和 TM 偏振光,借助麦克斯韦方程组和边界条件求出 TE 和 TM 偏振分量反射和透射衍射效率,从理论上分析了亚波长光栅对 TE 和 TM 偏振分束的原理。

亚波长金属光栅偏振器的偏振分束性能主要包括衍射效率和消光比。其中,金属偏振光栅的消光比是评价其偏振性能的最重要的性能参量。所设计的亚波长光栅不仅偏振分束效果明显,而且仅在零级衍射级次对 TE 和 TM 波进行反射和透射,定义 TM 波在 0 级的透射消光比 T_c 和 TE 波 0 级反射消光比分别为:

$$T_c=10\log_{10}(T_0^{TM}/T_0^{TE}) \quad (1)$$

$$R_c=10\log_{10}(R_0^{TE}/R_0^{TM}) \quad (2)$$

式中: T_0^{TM} 、 R_0^{TM} 分别表示 TM 波 0 级的透射和反射的衍射效率, T_0^{TE} 、 R_0^{TE} 分别表示 TE 波 0 级的透射和反射衍射效率。

为光栅实现 TM 波和 TE 波偏振分束,采用遗传算法对光栅结构参数进行优化设计。遗传算法^[14-15]是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应全局优化概率搜索算法,经过数学分析确定遗传算法目标方程、适应度函数。由于其简单易行,因此,在各个领域都有广泛应用。定义适应度函数 RMS 如下:

$$RMS=\text{mean}(1/(T_0^{TM}+R_0^{RE})+T_0^{TE}+R_0^{TM}) \quad (3)$$

其中,RMS 的值越小,表明光栅的偏振分束效果越明显。

1.2 光栅结构模型

亚波长夹层式金属光栅的结构如图 1 所示,该结构由基底、光栅层和覆盖层组成。一束平面波从空气以入射角 $\theta=0^\circ$ 垂直进入光栅,其中, λ 表示入射波

长, θ 表示入射角, T 表示光栅周期, f 表示占空比, 即光栅宽度与周期的比值, $D1$ 表示覆盖层厚度, $D2$ 表示光栅槽深。

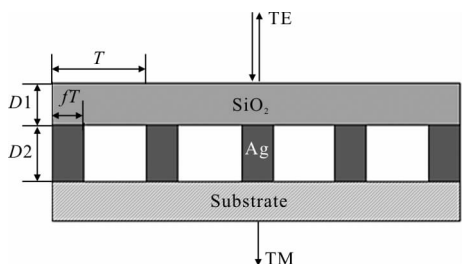


图 1 金属光栅结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of metal grating structure

不同的金属光栅材料直接影响光栅的偏振性能, 亚波长金属光栅中常用的金属材料有金、银、铝、铜、铬五种金属^[3]。由于金属银价格合理, 可塑性强等优点, 文中选用金属银作为刻蚀光栅层。基底和覆盖膜层选用 SiO₂, 覆盖层对光栅的偏振分束起到一定的调制作用。

2 优化结果与分析

为实现高衍射效率、高消光比、宽带宽、大角度偏振光栅的设计要求, 在中心波长 800 nm 处, 采用 RCWA 和遗传算法对光栅的周期、槽深、占空比等参数进行优化, 得到最佳光栅结构如表 1 所示。

表 1 光栅结构的最优参数

Tab.1 Optimized parameters of grating structure

f	T/nm	$D1/\text{nm}$	$D2/\text{nm}$	$\theta/(\text{°})$	λ/nm
0.21	180	225	300	0	800

经过模拟优化, 所设计光栅衍射效率随入射波长变化的光谱曲线如图 2 所示, 由图可以看出入射波长为 $702 \text{ nm} < \lambda < 909 \text{ nm}$ 时, TM 偏振的透射率和 TE 偏振的反射率均大于 95%; 波长在 $764 \text{ nm} < \lambda < 855 \text{ nm}$ 时, TM 偏振的反射率和 TE 偏振的透射率均小于 1%。在中心波长 800 nm 处, TM 偏振的透射率和 TE 偏振的反射率分别为 98% 和 96.5%, 该光栅的衍射效率高, 对入射光的损耗较低, 实现了对 TE 和 TM 波的偏振分束。图 3 给出了光栅透射和反射消光比随入射波长的变化曲线, 由图可以看出, 当波长在 $747 < \lambda < 854 \text{ nm}$ 范围内变化时, 反射消光比

大于 20 dB; 波长为 $700 \text{ nm} < \lambda < 900 \text{ nm}$, 光栅的透射消光比大于 27.4 dB。由此可见, 该光栅在 $747 \text{ nm} < \lambda < 854 \text{ nm}$ 的宽光谱范围内保持了高的偏振分束能力。

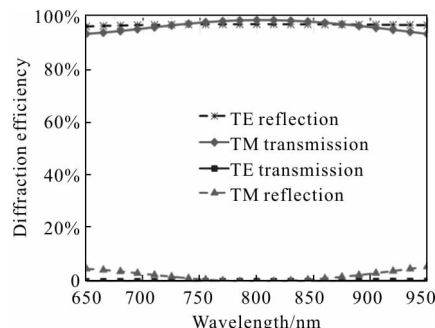


图 2 衍射效率随波长的变化曲线

Fig.2 Diffraction efficiency versus the wavelength

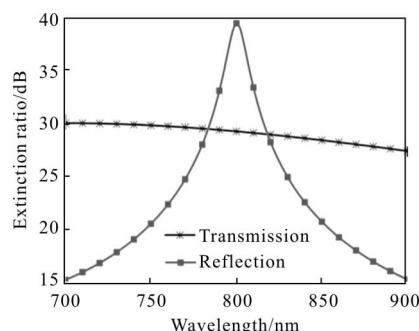


图 3 透射和反射消光比随波长的变化曲线

Fig.3 Transmission and reflection extinction ratios versus the wavelength

当入射波长为 800 nm 时, 光栅衍射效率随入射角的变化关系如图 4 所示。可以看出, 当入射角 $-30.3^\circ < \theta < 30.3^\circ$ 时, TM 偏振的透射率和 TE 偏振的反射率均大于 95%, 入射角为 $-27^\circ < \theta < 27^\circ$ 时, TM 偏振的反射率和 TE 偏振的透射率均小于 1%, 在较大入射角范围内实现了入射光的偏振分束。图 5 给出

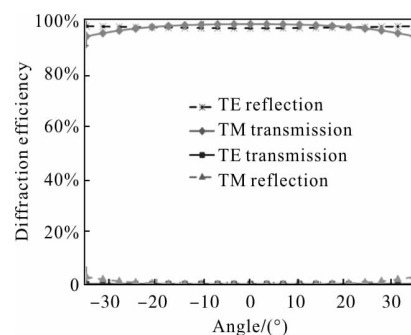


图 4 衍射效率随入射角的变化曲线

Fig.4 Diffraction efficiency versus the incident angle

了波长为 800 nm 时, 光栅透射和反射消光比随入射角的变化规律。当入射角 $-27^\circ < \theta < 27^\circ$ 时, 光栅反射消光比都大于 20 dB, 当入射角 $-35^\circ < \theta < 35^\circ$ 时, 光栅透射消光比大于 29.2 dB, 当光线垂直入射时, 透射和反射消光比分别为 29.2 dB 和 39.5 dB。可见, 该光栅在 $-27^\circ < \theta < 27^\circ$ 的大角度范围内实现了 TE 和 TM 的偏振分束。

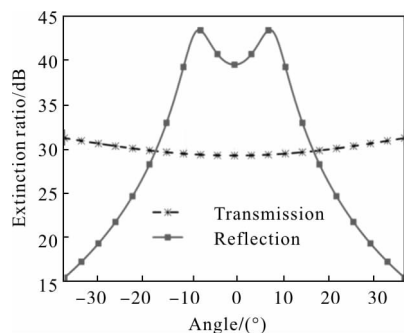


图 5 透射和反射消光比随入射角的变化曲线

Fig.5 Transmission and reflection extinction ratios versus the incident angle

结果显示, 在 800 nm 处 TM 偏振的透射波和 TE 偏振的反射波的衍射效率分别为 98% 和 96.5%, 该偏振光栅在 0 级衍射级次上 TM 偏振的透射率和 TE 偏振的反射率大于 95% 的工作带宽达到 207 nm, 光栅透射和反射消光比都大于 20 dB 的角度变化范围达到 54° , 满足高衍射效率、高消光比、宽带宽及大角度的设计要求。

3 工艺容差分析

由于控制精度和微加工技术的影响, 光栅的槽深、覆盖层厚度、周期在制备过程中会存在一定误差, 以及入射角变化都会对光栅的偏振效果产生影响, 因此对光栅各结构参数进行工艺容差分析对光栅实际制备具有重要意义。

图 6、图 7 分别给出了光栅透射和反射消光比随光栅槽深与覆盖层厚度变化的等高图。由图 6 可见, 当固定其他参数时, 覆盖层在 $150 \text{ nm} < D1 < 300 \text{ nm}$, 槽深在 $275 \text{ nm} < D2 < 350 \text{ nm}$ 之间变化时, 透射消光比都大于 25 dB。由图 7 可以看出当覆盖层在 $217 \text{ nm} < D1 < 242 \text{ nm}$, 槽深在 $259 \text{ nm} < D2 < 315 \text{ nm}$ 之间变化时, 反射消光比都大于 30 dB。从光栅的制备工艺角度来看, 当光栅的槽深在 $259 \text{ nm} < D2 < 315 \text{ nm}$ 或是

覆盖层厚度在 $217 \text{ nm} < D1 < 242 \text{ nm}$ 之间变化时, 该结构对槽深和覆盖层均具有较大的工艺容差。

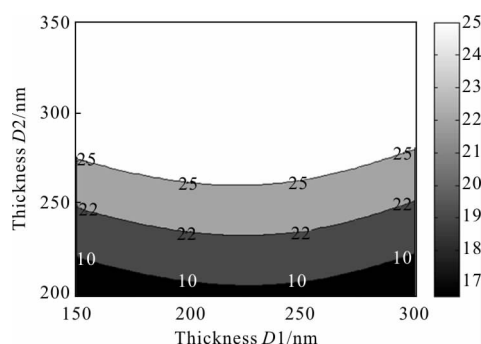


图 6 透射消光比随槽深及覆盖层厚度变化

Fig.6 Transmission extinction ratios versus groove depth and covering layer thickness

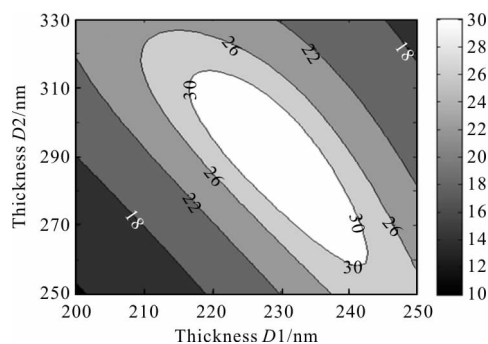


图 7 反射消光比随槽深及覆盖层厚度变化

Fig.7 Reflection extinction ratios versus groove depth and covering layer thickness

图 8、图 9 分别给出了透射和反射消光比随周期与入射角变化的等高图。当入射角在 $-30^\circ < \theta < 30^\circ$ 之间变化时, 由图 8 可见周期在 $50 < T < 187 \text{ nm}$ 时, 透射消光比都大于 30 dB。从图 9 可以看出, 周期在 $114 \text{ nm} < T < 315 \text{ nm}$ 之间时, 反射消光比都大于 30 dB。从制备工艺角度来讲, 当光栅的入射角

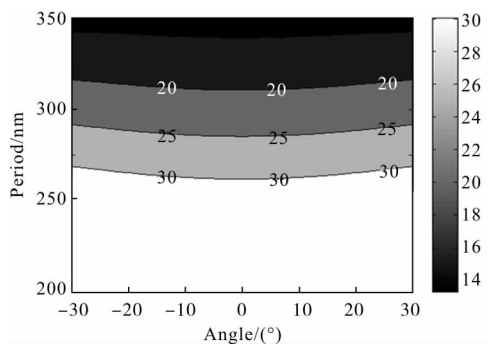


图 8 透射消光比随周期及入射角变化

Fig.8 Transmission extinction ratios versus period and incident angle

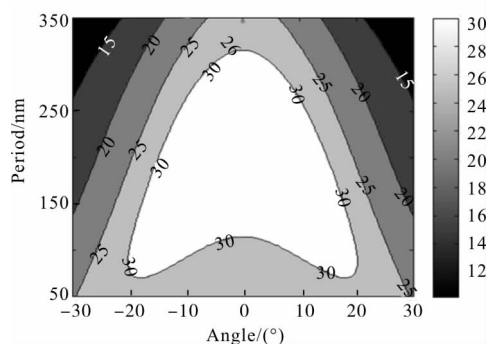


图 9 反射消光比随周期及入射角变化

Fig.9 Reflection extinction ratios versus period and incident angle

在 $-30^\circ < \theta < 30^\circ$ 或是周期在 $114 \text{ nm} < T < 187 \text{ nm}$ 之间变化时, 该光栅对入射角和周期的工艺容差相对较大。

由此可见, 所设计的亚波长金属偏振分束光栅对光栅周期、槽深、覆盖层的厚度都有较大的工艺制备容差, 减小了实际制备中的误差对偏振分束效果的影响。

4 结论

文中基于严格耦合波理论和遗传算法, 设计并优化了一种亚波长夹层式金属偏振分束光栅。该光栅结构简单、制备成本低、性能稳定、偏振效果明显、对入射光损耗低。

光栅衍射效率及消光比的优化结果显示, 所设计的光栅在 0 级衍射级次上 TM 偏振波的透射率和 TE 偏振波的反射率分别为 98% 和 96.5%, 在 $747 \text{ nm} < \lambda < 854 \text{ nm}$ 波段和 $-27^\circ < \theta < 27^\circ$ 大角度范围内, 光栅透射和反射消光比都大于 20 dB, 实现了 TM 偏振波的高透和 TE 偏振波的高反。对中心波长为 800 nm 的光波, 其衍射效率优于 95% 的工作带宽为 207 nm, 符合高衍射效率、高消光比、宽带宽、大角度的设计要求。在制备工艺角度来看, 亚波长金属光栅对槽深、覆盖层深度和周期对制备工艺具有较大的工艺容差, 在激光器系统、偏振成像、光学偏振器件等领域具有广泛的应用前景。

参考文献:

[1] Li Shujun, Jiang Huilin, Zhu Jingping, et al. Development status and key technologies of polarization imaging detection

[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 803–809. (in Chinese)
 李淑军, 姜会林, 朱京平, 等. 偏振成像探测技术发展现状
 及关键技术[J]. 中国光学, 2013, 6(6): 803–809.
 [2] Wu Na, Tan Xin, Yu Haili, et al. Design and fabrication of
 broadband holographic ion beam etching gratings [J]. *Optics
 and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 1979–1982. (in Chinese)
 吴娜, 谭鑫, 于海利, 等. 宽波段全息-离子束刻蚀光栅的
 设计及工艺[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 1979–1982.
 [3] 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 of Sensors and
 Actuators*, 2006, 19(5): 1739–1742. (in Chinese)
 张娜, 褚金奎, 赵开春, 等. 基于严格耦合波理论的亚波长
 金属光栅偏振器的设计 [J]. 传感技术学报, 2006, 19(5):
 1739–1742.
 [4] Wang Zhiwen, Chu Jinkui, Wang Qianyi. Transmission
 analysis of single layer sub-wavelength metal gratings [J].
Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0705002. (in Chinese)
 王志文, 褚金奎, 王倩怡. 单层亚波长金属光栅偏振器透
 射机理研究[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0705002.
 [5] Liu Jing, Liu Juan, Wang Yongtian, et al. Resonant
 properties of sub-wavelength metallic gratings [J]. *Chinese
 Optics*, 2011, 4(4): 363–368. (in Chinese)
 刘镜, 刘娟, 王涌天, 等. 亚波长金属光栅的表面等离子体
 激元共振特性[J]. 中国光学, 2011, 4(4): 363–368.
 [6] Leng Yanbing, Dong Lianhe, Sun Yanjun. Study on 1×11
 dammann grating with sub-wavelength structure [J].
Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(3): 813–816. (in
 Chinese)
 冷艳冰, 董连和, 孙艳君. 1×11 亚波长结构 Dammann 光栅
 的研制[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 813–816.
 [7] Chu Jinkui, Wang Zhiwen, Zhang Yingjie, et al. Multi-
 orientated wire-grid polarizer and its application to
 polarization navigation [J]. *Optics and Precision
 Engineering*, 2012, 20(10): 2237–2244. (in Chinese)
 褚金奎, 王志文, 张英杰, 等. 多方向金属光栅偏振器及在
 偏振导航中的应用 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(10):
 2237–2244.
 [8] Wu Jun, Zhou Changhe, Cao Hongchao, et al. Broadband
 polarizing beam splitter with metal-wire nanograting in near
 infrared region [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 47
 (7): 166–170.
 [9] Wu Huaming, Mo Wenqin, Hou Jin, et al. Polarizing beam
 splitter based on a subwavelength asymmetric profile grating

- [J]. *Journal of Optics*, 2009, 12(1): 74–77.
- [10] Meng Fantao, Chu Jinkui, Han Zhitao, et al. Effect of profile error on performance of sub-wavelength wire-wire polarizer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(4): 951–955. (in Chinese)
孟凡涛, 褚金奎, 韩志涛, 等. 面形误差对亚波长金属光栅偏振器性能的影响[J]. 光子学报, 2009, 38(4): 951–955.
- [11] Zhao Huajun, Yang Shouliang, Zhang Dong, et al. Design of polarizing beam splitters based on subwavelength metal grating [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58 (9): 6236–6242. (in Chinese)
赵华君, 杨守良, 张东, 等. 亚波长金属偏振分束光栅设计分析[J]. 物理学报, 2009, 58(9): 6236–6242.
- [12] Afshar B A, Soltanpour P, Sabatyan A. Comprehensive analysis of diffraction efficiency of conical beam from sub-wavelength binary metallic grating using rigorous coupled-wave theory [J]. *Optik*, 2015, 126(24): 5504–5508.
- [13] Yang Liang, Li Yanqiu, Ma Xu, et al. Rigorous coupled wave analysis of grating –embedded multilayer structure conical diffraction [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1900–1902. (in Chinese)
杨亮, 李艳秋, 马旭, 等. 嵌入式光栅多层结构锥形衍射的严格耦合波理论研究 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(6): 1900–1902.
- [14] Liu Chaoming, Lou Shuqin. Application of the genetic algorithm in the demodulation of the FBG cross-sensitivity characteristics [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1859–1864. (in Chinese)
刘超明, 娄淑琴. 基于遗传算法的光纤光栅交叉敏感解调研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(6): 1859–1864.
- [15] Lao Dabao, Zhou Weihu, Li Wanhong. Cylindrical grating angle measurement technology based on genetic algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 2182–2188. (in Chinese)
劳达宝, 周维虎, 李万红. 基于遗传算法的柱面光栅测角技术研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7): 2182–2188.