

文章编号: 1001-3806(2015)03-0432-05

基于 OpenFilters 的 He-Ne 气体辉光压制窄带滤光片

张 欣, 胡志芬, 吴素勇*, 谭中奇

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 长沙 410073)

摘要: 为了解决环形激光器小型化中信号信噪比随腔长减小而下降的问题, 设计了一种能压制 He-Ne 气体放电辉光而不影响激光光强的窄带滤光片。基于 OpenFilters 软件独有的“step”自动膜系设计方法, 以初始膜层厚度为线索, 设计了符合光谱特性实际应用要求的多个非规整膜系结构。考虑膜层数、膜层厚度及应力等因素, 选出便于石英晶振监控的窄带滤光片。在 45° 的入射角下, 该滤光片对 s 偏振光在 632.8nm 处的峰值透射率为 99.9%, 通带半峰值全宽为 5.2nm, 截止带平均透射率为 1.35%。结果表明, 该滤光片可有效压制 He-Ne 气体的放电辉光, 提高小型环形激光器的信噪比。

关键词: 激光技术; 辉光压制; 窄带滤光片; 环形激光器; OpenFilters 软件

中图分类号: O484.4 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.03.033

Narrow band filter for discharge glow suppression of He-Ne gas based on OpenFilters software

ZHANG Xin, HU Zhifen, WU Suyong, TAN Zhongqi

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to solve the problem of signal-to-noise ratio decreasing with the decreasing of cavity length during the miniaturization of ring laser, narrow band filter was designed for suppressing the discharge glow of He-Ne gas without affecting on laser output. Based the unique “step” automatic coating design method of OpenFilters software and using the initial film thickness as the clue, a number of non-structured membrane structures were designed for the requirements of practical application of spectral characteristics. An optimized narrow band filter for crystal monitoring was selected under the consideration of layer number, thickness and stress. When s polarization light was incident from the air at angle of 45°, the filter had peak transmittance of 99.9% at central wavelength of 632.8nm, full width at half maximum of 5.2nm and average transmittance at cutoff band of 1.35%. The results show that the filter can suppress the discharge glow of He-Ne gas effectively and improve the signal-to-noise ratio of miniaturized ring laser.

Key words: laser technique; glow suppression; narrow band filter; ring laser; OpenFilters software

引 言

作为惯性导航与制导的理想角速度敏感元件, He-Ne 气体环形激光器在西方发达国家的许多领域已取代了传统的机电陀螺仪, 特别是在飞机、舰船、潜艇、导弹、火炮、战车、火箭和卫星等载体上应用非常广泛^[1]。小型化是环形激光器发展的重要方向之一, 在降低成本、提高集成度的同时, 可满足对体积有严格要求的中、低等精度导航与制导的需求, 在军事领域上具有重要意义^[2]。霍尼韦尔的 GG1308 是最具代表性的

小型环形激光器, 已经广泛应用在众多的武器系统中, 如联合独立武器、全球鹰无人侦察机导航系统、烈火侦察机导航系统、P-3 合成孔径雷达天线、P-3C 反潜巡逻机改进系统的标准航向参考备份系统、陀螺罗盘传感系统和先进两栖攻击战车导航系统等^[3]。

在环形激光器小型化的过程中, 随着腔体的缩小, He-Ne 气体的有效增益长度减小, 激光光强变弱, 而气体放电产生的辉光强度基本不变, 信噪比受到严重影响, 给小型 He-Ne 环形激光器的读出信号解调和技术指标带来了不利影响, 因此, 需要研究一种能压制 He-Ne 气体放电辉光而又不影响有用激光信号的方案。从光学滤波的角度出发, 光栅或薄膜滤光片都具有透射一定波段、截止另一波段的特性^[4-5], 都可实现对 He-Ne 气体放电辉光的压制。但光栅存在以下不足: 易受机械振动干扰, 带来环境误差; 由于是窄缝, 工作

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61205157)

作者简介: 张 欣 (1992-), 男, 大学本科, 从事 He-Ne 环形激光器辉光压制方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: sywu2001@163.com

收稿日期: 2014-04-14; 收到修改稿日期: 2014-06-12

时必须采用大的前放倍数,这就使检测信号的噪声比较大;光栅维护和校准比较复杂。相比而言,薄膜滤光片安装好后不存在机械误差,适应环境能力强,特别是对湿度和温度的耐受性能好,通带信号光较强,易于得到噪声小的检测信号,结构简单、便于维护、易于小型化。据此,作者拟通过在环形激光器输出镜后表面上胶合一个薄膜滤光片,探讨对 He-Ne 气体的放电辉光进行压制的可行性。

1 辉光压制滤光片的指标确定

He-Ne 环形激光器是在环形谐振腔内充入低压 He-Ne 气体并以其为增益介质的气体激光器。根据公开发表的资料,可找到 He-Ne 激光器的一些可能激光谱线,但只是辉光的组成部分,尚未发现 He-Ne 环形激光器的完整辉光光谱分布曲线。为准确界定待研制滤光片的工作波段及参量指标,作者采用 Zolix 的光栅摄谱仪 SGM100 对小型 He-Ne 环形激光器的辉光和输出光进行光谱测试。测试时,将激光器置于留有孔洞的封闭盒中,待激光器的电源线、稳频线以及摄谱仪的光纤探测线缆经该孔洞置于封闭盒内后,用橡皮泥堵住该孔洞,以保证无外界杂散光进入干扰测量。测量过程是先不加激光器电源,测量封闭盒的背景噪声分布,然后点亮激光器,将摄谱仪的探头垂直激光器光路平面或迎着输出光的方向,分别测量辉光和激光器输出光的光谱分布,所得数据经光栅摄谱仪软件扣除背景噪声的影响后即为待求的光谱分布数据,测量结果如图 1 所示。

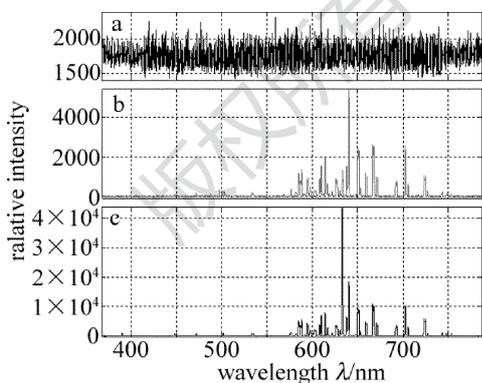


Fig. 1 Measurement results of spectral intensity distribution
a—background noise in the testing black box b—discharge glow perpendicular to ring Laser optical path plane c—output light of ring laser

图 1 中分别给出了封闭盒内的背景噪声、垂直激光器光路平面测得的辉光和迎着输出光的方向测得的激光器输出光的相对光强的光谱分布图,其中图 1b 和图 1c 都已扣除了背景噪声的影响。从图 1a 可以看出,封闭盒中的背景噪声的光谱分布较一致,说明没有外界杂散光的干扰。从图 1b 可以看出,环形激光器的

辉光的光谱范围较宽,从 380nm ~ 760nm 都有次峰,但主要分布在 570nm ~ 760nm 波段,最强的次峰为 640nm,理论上这些次峰的位置和强度大多与 Ne 原子的 $3S_2-2P_x$ 能级跃迁有关。因此,可确定待研制滤光片的工作波段至少应包含 570nm ~ 760nm 区间。图 1c 比图 1b 中多了 632.8nm 处的激光尖峰,其余次峰的位置彼此较为吻合,相对强度的形状也较为类似,反映出测量过程正确,光栅摄谱仪给出的测量结果具有较好的波长一致性,同时说明激光器输出光里确实含有 He-Ne 气体放电产生的辉光成分。

考虑到实际激光器为正方形,激光从近似真空中以 45° 入射角从输出镜出射,而待研制滤光片胶合在输出镜后表面,因此其在空气中的传播角也是 45° 。同时,由于斜入射时腔镜对 s 偏振光的反射率大于 p 偏振光,模式竞争的结果是只有 s 偏振光形成谐振,即输出激光为 s 偏振光。因此,根据以上测得的辉光光谱分布结果,可确定待研制窄带滤光片的设计指标:从空气中以 45° 入射,中心透射波长为 632.8nm,对 s 偏振光而言,峰值透射率尽可能高,且透射带半峰值宽度尽可能小,截止带为 570nm ~ 760nm 区间中除 632.8nm 波长处的中心透射带以外的波段,截止区透射率尽可能低。

2 辉光压制滤光片的膜系设计

根据市场调研,表 1 中给出 THORLAB 公司和 SEMROCK 公司的窄带滤光片产品正入射时的主要参量(没有斜入射产品)。可以看出,市售窄带滤光片具有较窄的通带半峰值宽度,但峰值透射率较低,最高只达 70%,且带宽越窄,峰值透射率越低。在实际的小型 He-Ne 环形激光器中,由于放电长度有限,导致增益本来就不大,因此对辉光压制滤光片而言,需要其峰值透射率尽可能高,尽可能不损失有用的激光光强信号。另一方面,市售窄带滤光片后表面通常未镀增透

Table 1 Specifications of Thorlab's and Semrock's narrow band filters

item #.	Thorlab's laser line filter		
	central wavelength/nm	full width at half maximum/nm	transmittance at peak/%
FL632.8-1	632.8 ± 0.2	1 ± 0.2	50
FL632.8-3	632.8 ± 0.6	3 ± 0.6	65
FL632.8-10	632.8 ± 2.0	10 ± 2	70
item #.	Semrock's laser line filter		
	central wavelength/nm	full width at half maximum/nm	transmittance at peak/%
633FS02	632.8 + 0.2/ - 0	1 ± 0.2	50
633FS03	632.8 + 0.5/ - 0	3 ± 0.6	50
633FS10	632.8 + 2.0/ - 0	10 ± 2.0	55

膜,而斜入射时后表面反射比正入射时更显著,以折射率为 1.52 的 K9 玻璃为例,*s* 偏振光从空气中以 45° 入射时,玻璃与空气界面的反射率达 9.67%,是正入射时反射率 4.26% 的 2.4 倍,带来不小的透射光强损失。因此,市售的窄带滤光片尚不能满足实际应用要求,需要自行设计。

膜系设计的理论基础是分层介质的电磁场 Maxwell 方程组。膜系光谱特性系数如反射率、透射率等与设计时使用的膜层结构参量间的关系比较复杂,多数情况下需要用特征矩阵来表示^[6-9],只有在简单的条件下才有解析的数学表达式。因此,目前膜系设计大都依赖强大的数值优化算法,利用计算机进行自动搜索^[10-13],少数膜系如增透膜、高反膜、F-P 窄带滤光片等可以用解析方法进行设计。具体设计时,一般使用商业性的膜系设计软件程序包,如 Macleod, TFCalc, FilmStar, Film Wizard, Optilayer 等,但其价格一般都要数万元,比较昂贵^[14]。为了促进更多的人参与到膜系设计算法的研究中来,避免花费大量的时间进行重复性的编程工作,在 2007 年国际干涉薄膜峰会上,加拿大 Ecole Polytechnique de Montreal 功能薄膜与表面工程实验室的 LAROCHE 博士和 MARTINU 教授等人决定免费开放他们编制的膜系设计软件 OpenFilters 的内部程序代码^[15]。OpenFilters 具有完善的多层膜光学特性分析功能、简洁的膜系设计界面及多种主流的优化设计方法,包括 step 法、needle 法、傅里叶变换法、渐近优化法等^[15]。

对待研制的辉光压制用窄带滤光片,如果具备了膜厚光学监控系统,采用 F-P 规整膜结构是最理想的,为实现较好的峰值透射率、矩形度、截止深度和带宽等光学性能,F-P 规整窄带滤光片一般需要较多的层数,通过多腔叠加来实现。由于受限于现有的石英晶振监控设备,本文将利用 OpenFilters 膜系设计软件的数值优化算法,着重探讨用非规整膜实现窄带滤光片的可能性。考虑到石英晶振监控法不具有光控法的膜厚

误差自动补偿机理,工程上希望在膜系设计时注意以下几点要求:(1)总的层数不宜过多,减小镀制难度和随机误差的影响;(2)各层膜几何厚度不宜过厚,尤其是高折射率层,避免累积应力,影响其高低温下的光谱性能;(3)各层膜几何厚度不宜过薄,避免引入较大的监控误差^[16-18]。

设计时,选用熔融石英作为基片材料,选取 Ta₂O₅ 和 SiO₂ 作为高、低折射率膜材料,其中 Ta₂O₅ 的性能稳定,且其折射率较高,易于提高截止深度,降低总层数,减小总厚度,而 SiO₂ 作为最常用的低折射率材料,膜层牢固,化学性能稳定,且应力性能与 Ta₂O₅ 良好匹配,有利于窄带滤光片的光学特性在高低温环境下保持稳定。根据单层膜采样测量结果,在 632.8nm 处其折射率分别为 2.125 和 1.46。在设置透射率目标时,选择 550nm ~ 625nm, 640nm ~ 760nm 为截止区,透射率上限设置为 1%,选择 625nm ~ 640nm 为透射区,透射区的透射率设置为 100%,透射率容差为 1%。原则上,可在透射区上选择设置较多的数据点,在截止区取相对少的点,以增加透射区的权重,尽可能得到高的峰值透射率。在此基础上,进一步对透射区的带宽进行微调,最终目标是获得尽可能高的峰值透射率和尽可能小的通带半宽,同时兼顾一定的截止深度,使窄带滤光片的光学性能最优化。

初次设计时,设定初始 Ta₂O₅ 层的几何厚度为 3000nm,在截止区 550nm ~ 625nm 和 640nm ~ 760nm 上分别选择 3 个数据点,即 550nm, 600nm, 625nm, 640nm, 700nm, 760nm,在透射区 625nm ~ 640nm 之间选择 40 个数据点,即从 630.8nm 开始每间隔 0.1nm 选择一个数据点,直至 634.8nm。利用 OpenFilters 软件提供的“step”自动合成方法进行全局设计,得到一个 25 层的膜系,记为 1[#] 滤光片,从空气中以 45° 入射时,对 *s* 偏振光,其主要光学性能列于表 2 中,透射率光谱曲线及折射率轮廓如图 2 所示。

可以看出,1[#] 滤光片在 632.8nm 处的峰值透射率

Table 2 Specifications of filter 1[#], 2[#], 3[#] for *s* polarization incident light at 45° from the air

filter	central wavelength /nm	full width at half maximum/nm	transmittance at peak/%	transmittance at 640nm/%	average transmittance of cut-off band/%	total thickness/nm
1 [#]	632.8	9.3	99.6	13.0	0.52	2934
2 [#]	632.8	5.4	99.9	11.5	0.99	2264
3 [#]	632.8	5.2	99.9	10.9	1.35	2042

较高,最强辉光 640nm 处的透射率尚可,截止带平均透射率较低,不足之处是其通带半波全宽较宽,且存在高折射率过厚层(第 5 层,厚度达 237nm),这主要是由于通带目标权重过重和初始膜厚设置过大和引起的。

下面在 1[#] 滤光片的基础上进行调整。首先减小初始膜层厚度,改小为 2000nm;其次将透射区缩小,改为 627nm ~ 638nm,以减小通带半宽度;最后减少通带目标点的数目以降低权重,即从 631.8nm 开始每间隔 0.1nm 选择一个数据点,直至 633.8nm。最终得到 1

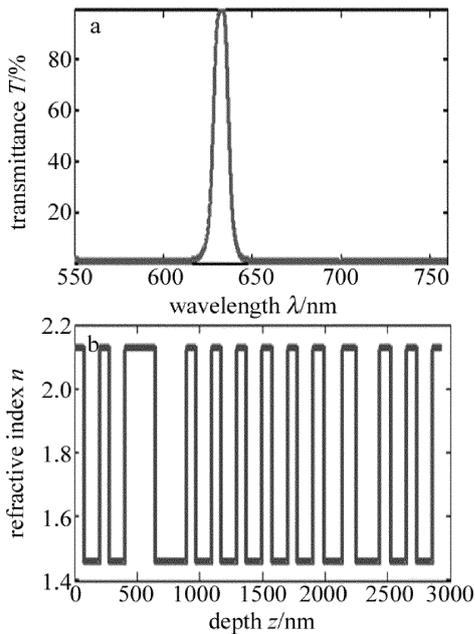


Fig. 2 Transmittance and refractive index of 1[#] filter for s polarization incident light at 45° from the air

个 21 层的膜系, 记为 2[#] 滤光片, 从空气中以 45° 入射时, 对 s 偏振光, 其主要光学性能列于表 2 中, 透射率光谱曲线及折射率轮廓如图 3 所示。可以看出, 2[#] 滤光片的总厚度有较大减小, 通带半波全宽有明显缩小, 截止带平均透射率有些许变差, 其余光学性能有些许提高。观察 2[#] 滤光片的折射率轮廓图, 发现存在过薄层(第 14 层, 膜厚仅 3nm), 可能造成较大的沉积厚度相对误差, 不利于实际监控。

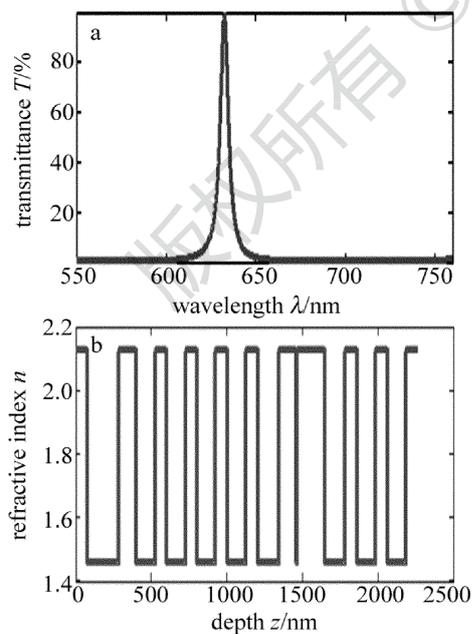


Fig. 3 Transmittance and refractive index of 2[#] filter for s polarization incident light at 45° from the air

由于 2[#] 滤光片的光学性能已基本符合设计要求, 故只需对其部分层的厚度进行一定改动, 提高实际最

优性。在 2[#] 滤光片增加第 14 层膜的厚度, 再进行全局优化, 最后得到一个 19 层的膜系, 记为 3[#] 滤光片, 从空气中以 45° 入射时, 对 s 偏振光, 其主要光学性能列于表 2 中, 透射率光谱曲线及折射率轮廓如图 4 所示, 图 5 中给出了其膜厚相对灵敏度和在 0.2% 的相对几何厚度监控误差下 s 偏振光透射率 T_s 的误差曲线。

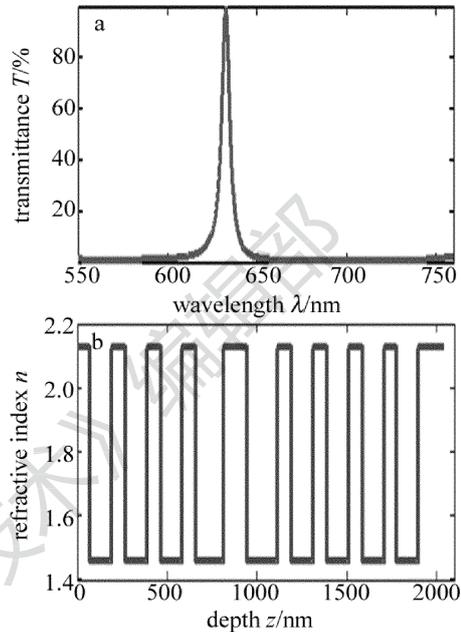


Fig. 4 Transmittance and refractive index of 3[#] filter for s polarization incident light at 45° from the air

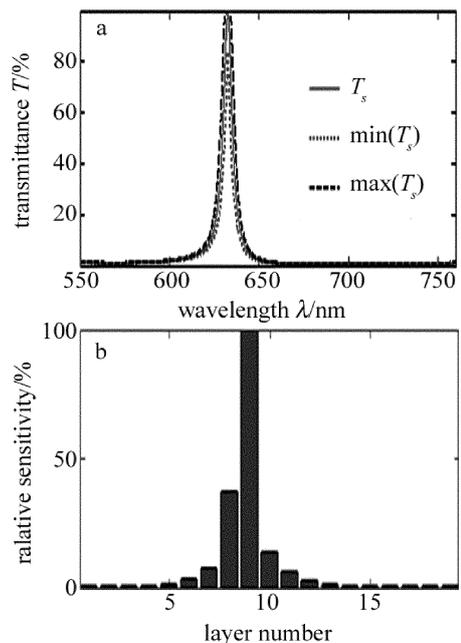


Fig. 5 Transmittance corridor and relative sensitivity of 3[#] filter for s polarization incident light at 45° from the air

从表 2 可以看出, 3[#] 滤光片牺牲了一定的截止带透射率, 使峰值透射率、半峰值全宽、最强辉光截止度、膜系总厚度等性能都得到改善。从图 4 可以看出, 3[#] 滤光片无过厚、过薄层, 最厚层为第 10 层 SiO₂ 膜, 厚

度为 167nm,最薄层为第 17 层 Ta₂O₅ 膜,厚度为 70nm,这对石英晶振监控和总应力控制是有利的。从图 5 可以看出,3[#]滤光片最敏感的是第 9 层,第 8 层和第 10 层次之,其余层不敏感,在 0.2% 的相对几何厚度监控随机误差下,透射率曲线形状未发生明显变化,峰值透射率在 84% ~ 100% 间波动,容差较好。

3 结 论

从小型环形激光器中 He-Ne 气体辉光造成激光器输出信号信噪比下降的问题出发,基于光学滤波的思想,利用 OpenFilters 膜系设计软件,在石英晶振监控下考虑膜层数、膜层厚度和累积应力等实际镀膜要求,对 He-Ne 气体放电辉光压制用的窄带滤光片进行了膜系设计,确定了一个 19 层的最优非规整膜系结构方案。从空气中以 45° 入射时,该滤光片对 s 偏振光在 632.8nm 处的峰值透射率为 99.9%,通带半波全宽为 5.2nm,截止带平均透射率 1.35%,可有效压制 He-Ne 气体的放电辉光,提高小型环形激光器输出信号的信噪比,有利于小型 He-Ne 环形激光器向更宽的范围拓展应用。

参 考 文 献

- [1] KING A D. Inertial navigation-forty years of evolution[J]. GEC Review, 1998, 13(3): 140-149.
- [2] CHOW W W, GEA-BANACLOCHE J, PEDROTTI L M. The ring laser gyro[J]. Review Modern Physics, 1985, 57(1): 62-64.
- [3] CAI M. Technology development and application of the laser gyroscope [J]. Aeronautical Science and Technology, 2009, 13(4): 9-12 (in Chinese).
- [4] JIA Y Ch, LI G, BAI Y Zh, *et al.* Study of factors influencing half bandwidth, rectangularity and steepness in design of narrow band-pass filter [J]. Infrared Technology, 2012, 34(8): 448-452 (in Chinese).
- [5] TANG X, YAO L F. Design of optical filters for three primary colors [J]. Laser Technology, 2014, 38(2): 274-277 (in Chinese).
- [6] MACLEOD H A. Thin-film optical filters[M]. London, UK: Institute of Physics Publishing, 2006: 37-42.
- [7] WU S Y, LONG X W, HUANG Y, *et al.* Calculation model for spectral coefficient's first and second order partial derivatives of multilayer optical coatings with respect to layer parameters[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(1): 83-90 (in Chinese).
- [8] TANG J F, GU P F, LIU X, *et al.* Modern optical thin film technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006: 140-161 (in Chinese).
- [9] FURMAN Sh, TIKHONRAVOV A V. Basics of optics of multilayer systems[M]. Paris, France: Editions Frontieres, 1992: 70-74.
- [10] WU S Y, LONG X W, YANG K Y. Accurate calculation and Matlab based fast realization of merit function's Hesse matrix for the design of multilayer optical coating[J]. Optoelectronics Letters, 2009, 5(5): 359-363.
- [11] WU S Y, LONG X W, YANG K Y, *et al.* Performance analysis of local optimization algorithm in reverse engineering of multilayer optical coatings[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0631001 (in Chinese).
- [12] YANG K Y, LONG X W, HUANG Y, *et al.* Design and fabrication of ultra-high precision thin-film polarizing beam splitter[J]. Optics Communications, 2011, 284(19): 4650-4653.
- [13] WU S Y, LONG X W, HUANG Y, *et al.* Fast realization algorithms of sensitivity control concept in the active design of multilayer optical coatings [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(6): 1471-1478 (in Chinese).
- [14] KAISER N, STOLZ C J. Optical society of america's 2007 topical meeting on optical interference coatings: overview [J]. Applied Optics, 2008, 47(13): OIC1-OIC7.
- [15] LAROCHE S, MARTINU L. OpenFilters: open-source software for the design optimization, and synthesis of optical filters [J]. Applied Optics, 2008, 47(13): C219-C230.
- [16] HUANG Y, WU S Y, YANG K Y. Active design of multilayer optical coatings based on sensitivity control [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0431002 (in Chinese).
- [17] WU S Y, LONG X W, YANG K Y. Application of thin film errors sensitivity control concept in robust design of multilayer optical coatings[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(10): 2391-2399 (in Chinese).
- [18] WU S Y, YANG K Y, TAN Zh Q. Robust design of a high-performance laser thin-film polarizing beam splitter with low layer errors sensitivity[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0231004 (in Chinese).