中国光学 Chinese Optics 核心期刊

截止斜率可控的蓝光防护光学薄膜

王雨思 周贤建 李青原 叶钊松 蔡源海 刘近秋 陈楠 卜轶坤

Blue-blocking optical thin films with controllable cutoff slope

WANG Yu-si, ZHOU Xian-jian, LI Qing-yuan, YE Zhao-song, CAI Yuan-hai, LIU Jin-qiu, CHEN Nan, Bu Yi-kun

引用本文:
王雨思, 周贤建, 李青原, 叶钊松, 蔡源海, 刘近秋, 陈楠, 卜轶坤. 截止斜率可控的蓝光防护光学薄膜[J]. 中国光学, 2021, 14(3): 544-551. doi: 10.37188/CO.2020-0212
WANG Yu-si, ZHOU Xian-jian, LI Qing-yuan, YE Zhao-song, CAI Yuan-hai, LIU Jin-qiu, CHEN Nan, Bu Yi-kun. Blue-blocking optical thin films with controllable cutoff slope[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 544-551. doi: 10.37188/CO.2020-0212

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2020-0212

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

卫星激光防护薄膜窗口的设计与制备技术研究

Design and preparation technology of laser protective film window of satellite

中国光学. 2019, 12(4): 804 https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0804

复杂动背景下的“低小慢”目标检测技术

LSS-target detection in complex sky backgrounds

中国光学. 2019, 12(4): 853 https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0853

高反射光学薄膜激光损伤研究进展

Research progress in laser damage of high reflective optical thin films

中国光学. 2018, 11(6): 931 https://doi.org/10.3788/CO.20181106.0931

电子束硅片图形检测系统中的纳米级对焦控制技术

Nano-scale focus control technology in electron beam wafer pattern inspection system

中国光学. 2019, 12(2): 242 https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0242

基于等离子喷涂的反射型激光防护涂层研究

Reflective laser protective coating based on plasma spraying

中国光学. 2017, 10(5): 578 https://doi.org/10.3788/CO.20171005.0578

气相辅助刮刀涂布法制备钙钛矿薄膜

Vapor assisted doctor blading process to fabricate perovskite thin films

中国光学. 2019, 12(5): 1028 https://doi.org/10.3788/CO.20191205.1028

文章编号 2095-1531(2021)03-0544-08

截止斜率可控的蓝光防护光学薄膜

王雨思[1], 周贤建[2], 李青原[1], 叶钊松[1], 蔡源海[1], 刘近秋[1], 陈 楠[1], 卜轶坤[1*]
(1. 厦门大学 电子科学与技术学院(国家示范性微电子学院), 厦门 福建 361000;
2. 瑞之路(厦门)眼镜科技有限公司, 厦门 福建 361000)

摘要: 为了减少短波蓝光对人眼的伤害, 同时确保蓝光对人体节律的有益调节, 精确控制 400~500 nm 的透射斜率在蓝光防护中尤为重要。本文提出非线性玻尔兹曼函数拟合长波通薄膜的方法, 分别通过非线性及线性光谱目标值优化得到膜系结构 (Z1) 和 (Z2)。通过对比 (Z1) 和 (Z2) 薄膜的光谱和导纳图, 分析可知经非线性目标值优化后的薄膜具有可控的斜率和更好的通带光谱性能。采用电子束蒸发离子束辅助沉积方法制备了 14 层蓝光防护薄膜, 其光谱性能满足新国标 GB/T38120—2019 的技术要求。结果表明, 所制备的单面光学多层薄膜在紫外 385~415 nm 的平均透过率小于 3.2%, 高能蓝光 415~445 nm 的平均透过率小于 30.88%, 有益蓝光 445~475 nm 的透过率大于 81.9%, 在剩余可见光波段的透过率大于 95.5%。该方法为蓝光防护提供了一个新的解决方案, 对于视觉防护、移动终端、眼镜、电脑桌面、移动数字屏幕等有潜在应用价值。

关 键 词: 防护薄膜; 电子束蒸发; 蓝光防护
中图分类号: O439 **文献标志码:** A **doi:** 10.37188/CO.2020-0212

Blue-blocking optical thin films with controllable cutoff slope

WANG Yu-si[1], ZHOU Xian-jian[2], LI Qing-yuan[1], YE Zhao-song[1], CAI Yuan-hai[1],
LIU Jin-qiu[1], CHEN Nan[1], Bu Yi-kun[1*]
(1. *School of Electronic Science and Engineering (National Model Microelectronics College), Xiamen University, Xiamen* 361000, *China*;
2. *Riccino (Xiamen) Optical Inc., Xiamen* 361000, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: buyikun*0522*@xmu.edu.cn*

Abstract: To reduce the damage to human eyes and ensure the beneficial regulation of the human rhythm by short-wave blue light, accurate control of the transmission slope of the 400~500 nm wavelength is particularly important in blue light protection. In this paper, a nonlinear Boltzmann function fitting method for long wave-pass thin films is proposed, and thin films (Z1) and (Z2) are obtained by optimizing the nonlinear and linear target, respectively. Admittance and transmittance diagrams of thin films (Z1) and (Z2) are shown that the thin film optimized by a nonlinear target has a controllable slope and better passband spectral performance. The blue-blocking thin film of 14 layers is fabricated using electron-beam evaporation assisted by an ion beam, which met the technical requirements of the new GB/T38120—2019 national standard. The results

收稿日期: 2020-12-03; **修订日期:** 2021-01-07
基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(No. U1505253); 厦门市科技计划项目(No. 3502Z20183003)
Supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1505253); Xiamen Science and Technology Planning Project (No. 3502Z20183003)

present that the average transmittance of the single-side thin film is less than 3.2% at 385~415 nm, less than 30.88% at 415~445 nm, more than 81.9% at 445~475 nm, and more than 95.5% at 500~800 nm. These promising results indicate that this design method provide a new solution for vision protection applications such as eyeglasses, computer desktop and mobile digital screens.

Key words: protective thin films; electron beam evaporation; blue-blocking protection

1　引　言

随着电脑、智能手机、移动显示设备等使用人群的不断增多, 屏幕的使用时长不断增加, 数码时代的用眼健康问题日益被关注。相关研究表明, 对人眼有害的蓝光波长范围为 415~455 nm, 高能蓝光不仅会对眼睛产生不可逆转的伤害, 同时会引发眼底视网膜启动光氧化机制。长期的蓝光照射会导致视网膜色素上皮细胞衰亡, 引起视网膜病变、黄斑变性、白内障、青光眼等眼科疾病[1]。另一方面, 460~480 nm 左右的蓝光光谱波长对于人体生物钟调节起着非常重要的作用。近年来, 对于如何有效防治蓝光损伤的同时, 也不影响蓝光衰减对于人体节律调节的影响研究, 成为热点课题, 在商用光源及防护镜片领域受到了广泛重视[2]。

目前, 有效的蓝光防护技术路线主要有两条: 一种是采用吸收方式, 即直接在镜片材质中加入吸收材料, 如褐色素、黄色素等着色剂实现短波蓝光透射衰减, 此类技术路线的典型代表为德国哈罗防蓝光护目眼镜, 该方案通过在镜片中添加吸收剂, 能过滤 97% 高能短波蓝光, 但其局限性在于, 该方案由于蓝光吸收过高将导致镜片发黄, 严重破坏了色中性, 这种产品只适用于专业电子防护, 在日光条件下不能满足一般镜片增透镀膜的需要; 另一种采用反射方式, 即利用光学镀膜方式对不同波段的滤光进行处理[3-4]。这也是目前国内外眼镜企业及激光防护领域所采取的主流技术路线。基于反射方式的防护薄膜种类繁多, 通过对特定波长光的滤除, 可以起到防护效果[5-7]。例如, 用于实现 400~500 nm 短波截止的滤光片称为干涉截止滤光片, 通过高低折射率多层介质薄膜间的干涉原理, 可对蓝光波段 415 nm~455 nm 实现高反射率, 对 475 nm~760 nm 蓝光波段实现高透过率, 进而对蓝光实现部分阻隔。现有方案的局限性在于, 干涉截止滤光片的截止斜率宽窄仅通过改变高低折射率薄膜的膜对周期数来实现。其光谱目标值的取值方法多采取与工业标准匹配的分段取值方法。目标值的设计往往是线性且随机的, 因而优化过程中不仅增加了运算量, 还由于解的不唯一性引入额外误差。由于截止斜率的调控精度不高, 容易造成 445~475 nm 的有益蓝光透射性能不达标的问题。

本文提出一种适用于 GB/T38120—2019 标准的斜率可控蓝光防护薄膜实用解决方案。通过改进薄膜设计过程中目标值的设定方法, 利用非线性玻尔兹曼函数拟合长波通薄膜结构, 获得非线性目标值; 并进一步优化膜系中的膜层厚度使其满足光谱设计要求; 改进的非线性目标值结合计算机辅助优化实现了厚度最优解的选取, 得到了斜率可高精度调控的全介质薄膜结构。研究发现利用改进的目标值优化膜系结构, 光谱通带波段具有明显的波纹减缓振荡效果。采用电子束蒸发离子束辅助沉积方法, 成功制备了具有蓝光防护功能的光学多层薄膜。该目标值设定方法能够更好地结合薄膜优化算法简化优化过程, 提高最优解选取精度, 更好地满足蓝光防护薄膜膜系设计的需要。

2　蓝光防护薄膜工业标准

由于白光 LED 的辐射光谱强度主要集中于 400~500 nm 范围, 峰值辐射强度局限在 415~455 nm 附近。因此, 445 nm 以下波长的光会对人眼造成伤害, 应该适当滤除。根据 GB/T 38120—2019《蓝光防护膜的光健康与光安全应用技术要求》, 蓝光防护膜的光透射比应满足表 1 中要求。另一方面, 昼夜节律响应函数的峰值在 464 nm 处, 主要位于 446~477 nm 的蓝光波段。同时根据国家轻工行业标准 QB/T 2506—2017《眼镜镜片光学树脂镜片》可知, 445 nm 以上波长的光, 对人体节律具有有益调节功能, 因此保证 445~475 nm 的高透过率至关重要, 这也就引入了透射波段精确调控的问题。

表 1 GB/T38120—2019 蓝光防护膜的光透射比要求

Tab. 1 Light transmittance requirement of blue-blocking protective thin films according to GB/T38120—2019

光谱范围λ/nm	光透射比要求
385≤λ<415	<75%
315≤λ<445	≤80%
445≤λ<475	>80%
475≤λ<505	>80%

其中光透射比计算公式为:

$$\tau(\lambda)=\frac{\int_{\lambda 1}^{\lambda 2}E_1(\lambda)\mathrm{d}\lambda}{\int_{\lambda 1}^{\lambda 2}E_0(\lambda)\mathrm{d}\lambda}=\frac{\int_{\lambda 1}^{\lambda 2}T(\lambda)E_0(\lambda)\mathrm{d}\lambda}{\int_{\lambda 1}^{\lambda 2}E_0(\lambda)\mathrm{d}\lambda}=\frac{\int_{\lambda 1}^{\lambda 2}T(\lambda)E_s(\lambda)\mathrm{d}\lambda}{\int_{\lambda 1}^{\lambda 2}E_s(\lambda)\mathrm{d}\lambda},\tag{1}$$

式中 λ 为波长,单位为纳米 (nm); $E_0(\lambda)$ 为光源初始光谱能量分布; $E_1(\lambda)$ 为光路中加入镜片后的光谱能量分布。为方便统一计算,用 $E_s(\lambda)$ 太阳光谱功率分布代替 $E_0(\lambda)$。为了对上述有害蓝光滤除及有益蓝光增强进行准确评估,利用两个参数精确评价蓝光护目镜片及薄膜的光谱性能:蓝光透射比 $\tau_{s,b}$ 可以量化评估由于暴露于蓝光辐射而可能对视网膜造成的损害程度;445~475 nm 光透射比 τ_c 可用于衡量蓝光阻隔对节律的影响; $\tau_{s,b}$ 与 τ_c 计算公式如下:

$$\tau_{s,b}=\frac{\int_{380}^{500}T(\lambda)E_s(\lambda)B(\lambda)\mathrm{d}\lambda}{\int_{380}^{500}E_s(\lambda)\mathrm{B}(\lambda)\mathrm{d}\lambda},\tag{2}$$

$$\tau_c(\lambda)=\frac{\int_{445}^{475}T(\lambda)E_s(\lambda)\mathrm{d}\lambda}{\int_{445}^{475}E_s(\lambda)\mathrm{d}\lambda}.\tag{3}$$

式(2)中,蓝光危害的波段主要集中于 400~500 nm,峰值波长为 437 nm。蓝光危害加权函数 $B(\lambda)$ 数据来自 GB/T 20145—2006。式(3)中,波段 445~475 nm 的选取可以用于量化镜片抑制蓝光辐射对人体昼夜节律的影响能力。镜片对昼夜节律的影响由 τ_c 表示。$\tau_{s,b}$ 的取值范围为 0~1, $\tau_{s,b}$=0 表示镜片完全阻挡蓝光,镜片完全阻挡蓝光对昼夜节律影响较大不利于褪黑素分泌。$\tau_{s,b}$=1 表示镜片没有蓝光阻隔能力,不会影响正常昼夜节律。

3 蓝光防护薄膜的设计

3.1 改进的非线性目标值选取方法

对于在 500~800 nm 波段具有很高的透过率,在相邻的 400~450 nm 波段上急速过渡到透射被完全截止状态,这种类型的光谱设计可以通过干涉截止滤光片实现[8]。常用高、低折射率相互交替的透明介质材料 TiO_2/SiO_2 来设计膜系,膜系初始结构可表示为 (0.5HL0.5H)^s。s 为对称膜系的周期; 0.5H 表示光学厚度为 1/8 波长的高折射率 TiO_2 材料; L 表示光学厚度为 1/4 波长的低折射率 SiO_2 材料。TiO_2/SiO_2 膜对组合的多层膜系在透射带内利用等效折射率 E 替换成单层膜,膜系反射率在两个数值之间振荡,分别是:

基片反射率:

$$R_1=(\eta_0-\eta_g)^2/(\eta_0+\eta_g)^2,\tag{4}$$

上包络反射率:

$$R_2=(\eta_0-E^2/\eta_g)^2/(\eta_0+E^2/\eta_g)^2.\tag{5}$$

极大极小值总出现在等效位相厚度 $\Gamma=\frac{m\pi}{2S}$ 时,且反射曲线的包络并不随着周期数改变而改变,反射次峰的个数随层数增加而增加。式 (4),式 (5) 解释了通带内出现振荡波纹的原因,为进一步压缩通带内波纹指明了方向。

目前,最普遍的消除波纹的方法为改变周期内的膜层厚度,以实现薄膜和基板以及薄膜和空气之间的相位匹配。结合计算机辅助算法使等效折射率变为更接近的预期值。光学薄膜的优化问题本质是通过构建初始膜系的响应特性 $R(\lambda)$ 与所期望的理想特性 $RD(\lambda)$ 之间的差别构成评价函数,来评价设计性能的优劣。优化方法主要有:最小二乘法、准牛顿法、共轭梯度法、单纯形法、黄金分割法以及聚类全局优化算法等[9]。对于自动优化设计来说,初始结构的选取对于最终优化结果的优劣尤为重要。初始结构的选取一般要求有经验的人员从平时的积累或者解析分析中得出。例如,滤光片的目标反射率可以取下列特征的理想化参数:

$$RD[\lambda]=\begin{cases}0\,(380\ \mathrm{nm}\leqslant\lambda<450\ \mathrm{nm})\\1\,(500\ \mathrm{nm}\leqslant\lambda<800\ \mathrm{nm})\end{cases},\tag{6}$$

构造不同类型的评价函数, 如计算平方和型评价函数最小值, 进而得到理想的设计结果。

$$F=\sum_{\lambda=380}^{800}\omega_{\lambda}(R[\lambda]-RD[\lambda])^{2}\quad .\qquad (7)$$

值得注意的是, 目标值的线性理想参数在截止带与通带过渡区域取值不好, 尖点与未能重合区域会在评价函数中占一定的比例, 给评价函数收敛带来难度与额外的计算量。这就影响了滤光片在通带的光谱性能, 导致通带内透射波纹不能很好消除。另外, 该方法不能较好地实现斜率调控的目的, 收敛过程随机, 对于高精度控制斜率及计算机寻找特殊曲线类型的计算结果会令人失望。

本文采用与薄膜类型一致的函数关系获取非线性目标值。图 1(彩图见期刊电子版)是常规光学薄膜设计流程图, S1,S2,S3 为长波通薄膜结构不同膜对周期数 S 的仿真透射光谱曲线。可见, 曲线斜率随着周期数的增加而变陡峭。以往的设计中, 当薄膜材料固定时, 周期数 S 为调节长波通滤光片斜率的主要参数。由图 1 可知, 周期数增多虽然可以使得截止斜率更加陡峭, 然而并不能实现对斜率的精准调控。通过 OriginPro 软件拟合长波通薄膜结构的光谱, 得到非线性玻尔兹曼方程。根据国标要求, 通过调整非线性玻尔兹曼方程的 4 个参数, 能够实现对斜率及截止位点的参数化调制。

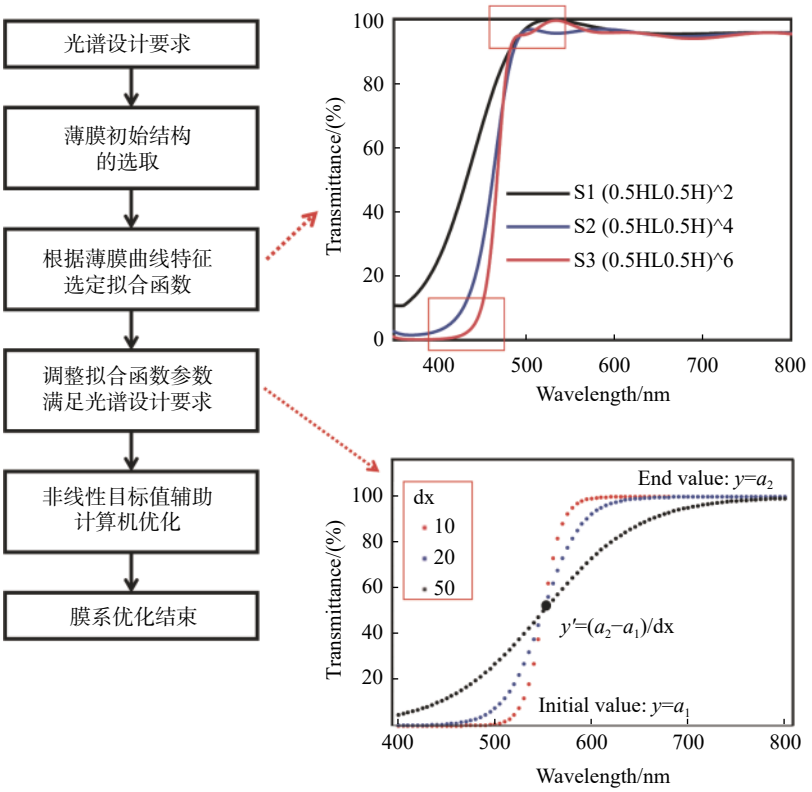

图 1　非线性目标值的光学薄膜设计流程图

Fig. 1　Flowchart of optical thin film design based on a nonlinear target

3.2　满足蓝光防护要求的光谱目标值

利用上述拟合方法得到的函数关系还不能满足蓝光防护的光谱设计要求, 需要对函数方程参数进行调整。表 2 描述了不同参数条件下, 玻尔兹曼函数曲线的分布规律。该函数利用参数 a_1 表示初始值; a_2 表示最终值; $(a_2-a_1)/\mathrm{d}x$ 表示曲线斜率; 中点位置横坐标用 X_0 表示。通过调节以上参数, 使得函数曲线满足国标要求, 即可找到满足条件的光谱目标值。*A*1-*D*1 描述了中心坐标 X_0 在 400~460 nm 每隔 20 nm 取值所得的函数曲线, 用于分析蓝光衰减波长的最佳位点。*A*2-*D*2 曲线为调整斜率的曲线, 用于分析光谱斜率与蓝光防护性能之间的影响。

表 2 玻尔兹曼目标值参数取值

Tab. 2 Values of Boltzmann target parameter

拟合函数 Boltzmann $y = a_2 + \frac{a_1 - a_2}{1 + e^{(x-x_0)/dx}}$								
参数	*A*1	*B*1	*C*1	*D*1	*A*2	*B*2	*C*2	*D*2
A_1	0	0	0	0	0	0	0	0
A_2	100	100	100	100	100	100	100	100
X_0	460	440	420	400	460	440	420	400
dx	10	10	10	10	30	30	30	30

将得到的 8 组曲线 *A*1~*D*1, *A*2~*D*2 带入式 (2), 式 (3), 得到蓝光阻隔参数 $\tau_{s,b}$ 以及昼夜节律影响参数 τ_c, 如图 2(彩图见期刊电子版)所示。由于滤光片性能需要在实现短波蓝光衰减的同时, 保证 445~475 nm有益蓝光的透射功能, 所以对于 430~450 nm 波段的斜率边缘陡峭程度的控制就显得尤为关键。图 2 中蓝色区域表示曲线能够同时兼顾蓝光阻隔及节律调节功能的取值范围。因此, 利用 *B*1 曲线类型作为目标值用于多层薄膜设计, 可以实现符合要求的深截止蓝光防护薄膜。

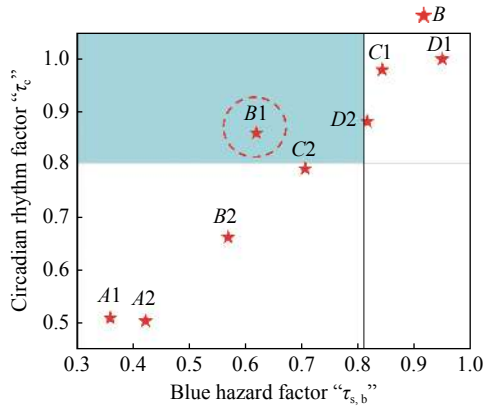

图 2 蓝光阻隔参数 $\tau_{s,b}$ 与昼夜节律影响参数 τ_c 计算结果

Fig. 2 Calculation results of blue hazard factors $\tau_{s,b}$ and circadian rhythm factors τ_c

3.3 多层光学薄膜结构优化

分别利用玻尔兹曼非线性目标值 *B*1 和线性目标值优化得到膜系结构, 仿真透射光谱结果如图 3(彩图见期刊电子版)所示。以 K_9 为基板(n_s = 1.52), 选用 (H/2 L H/2)^S 长波通薄膜初始结构。薄膜材料选用较高折射率材料 TiO_2(n_{TiO_2} = 2.25 @510 nm) 与 SiO_2 (n_{SiO_2} = 1.45@510 nm) 作为膜对组合, 可以在较少的层数下达到光谱要求[10]。SiO_2 膜层结构为无定型态, 在工作波长上色散较小, 消光系数低, 吸收少, 是一种理想的低折射率材料[11-12]。目标值优化过程通过设定与长波通“S”线形一致的光谱目标(Target), 利用玻尔兹曼函数得到满足蓝光光谱特性要求的目标函数 *B*1, 结合局部优化算法对膜层厚度进行精细修正来完成设计。膜系设计的初始结构保持了相同的 14 层薄膜结构, 带入 Macleod 中优化, 用以说明相同层数和膜系结构条件下, 线性及非线性目标值对通带内光谱性能的影响。Simplex Parameters 中的迭代次数等相关参数保持一致。目标值数据波长间隔选为 1 nm, 范围为 380~780 nm。基于线性目标值优化得到的膜系 Z1 为:

Z1: Glass/8.79 nm H/65.48 nm L/21.08 nm H/62.69 nm L/30.06 nm H/57.1 nm L/33.63 nm H/72.92 nm L/20.83 nm H/92.29 nm L/35.75 nm H/37.13 nm L/48.94 nm H/115.56 nm L/Air

膜层总厚度为 702.24 nm, 总层数为 14 层。数字代表物理厚度。同理, 基于线性目标值优化得到的膜系 Z2 为:

Z2: Glass/28.16 nm H/55.26 nm L/45.28 nm H/70.54 nm L/37.63 nm H/69.7 nm L/43.49 nm H/72.19 nm L/40.15 nm H/58.35 nm L/43.33 nm H/53.47 nm L/10 nm H/79.8 nm L

膜层总厚度为 697.37 nm, 总层数为 14 层。数字代表物理厚度。

图 3(a)、3(c) 分别为基于非线性和线性目标值优化得到的薄膜 400~800 nm 透射光谱。图 3(b)、3(d) 为各种透射光谱 500~800 nm 波段的局部放大图。可见, “S”线形的函数目标值优化得到的透射振荡区间范围明显小于直线段线形目标值优化结果, 具有更平坦的光谱性能。为了更好地分析基于线性及非线性目标值优化得到的多层膜通带透射曲线的增透及振荡程度, 仿真得到不同层数的蓝光防护膜的导纳终点在 500 到 800 nm 处的轨迹图, 如图 3(e)~3(f)所示。根据反射公式, n_0 为空气的折射率, *Y* 为膜层的等效导纳。若使薄膜在 500~800 nm 内高透, 由 *R*=1−*T* 可知, n_0=*Y* 时可使反射为零。图 3(e)中蓝色实线表示的导纳轨迹在 500~800 nm 内, 位于 Air(1, 0)附近。而图 3(f)中, 500~800 nm 内的导纳轨迹偏离(1, 0)程度较高, 因而透射光谱具有更高的振荡效果。对比分析上述线性及非线性目标值优化结果可看出, 改进的玻尔兹曼目标值优化得到的蓝光

防护薄膜结构具有明显的斜率控制和通带波纹压缩特点。分析仿真光谱可知, 改进的目标值取值方法具有明显的斜率控制和通带波纹压缩特点。由 500~800 nm 导纳轨迹可知, 通带波纹压缩是由于平滑的目标值曲线, 特别是拐点处的目标值与光谱值差异性减少导致的。

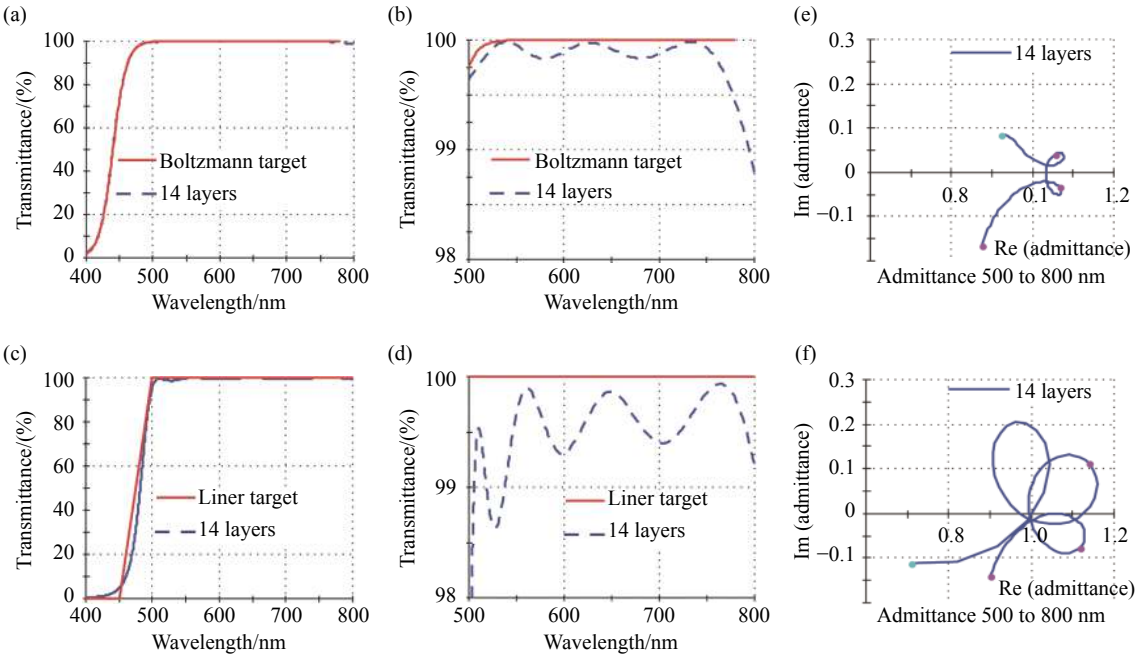

图 3　基于非线型((a), (b), (e))及线型((c), (d), (f))目标值设计蓝光防护薄膜的仿真透过率和导纳轨迹曲线

Fig. 3　Theoretical design of transmittance curve of blue light protective film based on nonlinear ((a), (b), (e)) and linear ((c), (d), (f)) targets

4　蓝光防护薄膜的制备和分析

4.1　单层膜表征

实验采用 ZZS850 型电子束蒸发离子束辅助沉积系统分别制备蓝光防护单层薄膜和多层薄膜, 离子源采用中国科学院空间中心 K12 考夫曼宽束离子源进行离子辅助沉积[13]。电子枪蒸镀过程中, TiO_2 容易失氧, 会形成不同的结晶态。为了得到完整的 TiO_2 膜, 以 Ti_3O_5 颗粒材料作为蒸发的源材料最好, 因为它可以产生相当恒定的折射率和更好的耐磨性。单层 TiO_2 薄膜沉积参数: 离子源偏压为 300 V; 离子束流为 120 mA; 沉积速率为 0.3 nm/s; 采用石英晶振控制, 基片温度为 65 ℃; Ar 气流量为 2 cm^3/min, O_2 流量为 10 cm^3/min; 镀膜基片选用厚度为 2 mm、直径为 20 mm 的 K_9 光学玻璃, 镀膜前基片采用酒精和乙醚混合液清洗; 并采用压强控制仪控制真空内的气体压力, 控制真空度为 1.5×10^{-2} Pa。单层 SiO_2 薄膜采用环形 SiO_2 作为蒸发材料。沉积速率为 1 nm/s, 其它沉积参数完全一样。

薄膜软件 Opti RE 用于拟合测量的透射光谱以获得 SiO_2 层的折射率。确定厚度及光学常数范围时, 由于 SiO_2 薄膜的消光系数在可见光波长范围内低于 1.0×10^{-4}, 对透射的影响可忽略不计。TiO_2 薄膜短波弱吸收使用柯西定律拟合折射率与波长的关系。拟合得到的单层膜光学常数如表 3 所示。

表 3　TiO_2 和 SiO_2 单层膜的光学常数

Tab. 3　Optical constants of the TiO_2 and SiO_2 thin films

波长(nm)	光学常数			
	TiO_2		SiO_2	
	n	*k*	*n*	*k*
400	2.6	0.000 1	1.48	0
450	2.51	0	1.47	0
500	2.44	0	1.47	0
550	2.39	0	1.467	0
600	2.37	0	1.46	0
650	2.34	0	1.46	0

4.2 多层膜制备

采用电子束蒸发离子束辅助沉积技术，根据 3.3 节，膜系 Z1 结构选择 TiO_2 和 SiO_2 分别作为高低折射率薄膜材料，得到 14 层蓝光防护薄膜。对制备的单面蓝光防护光学薄膜，采用 Lambda 750 分光光度计，对可见光 400~800 nm 内的透射曲线进行测试，实验结果如图 4 所示。

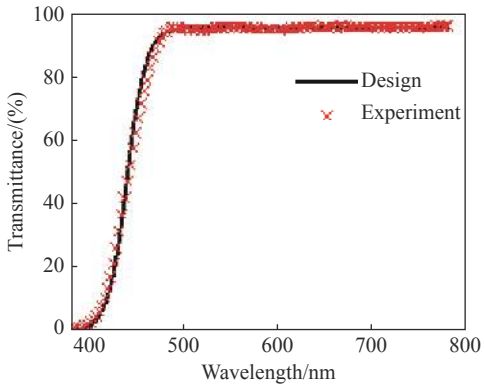

图 4 蓝光防护薄膜的 400~800 nm 透射曲线

Fig. 4 Transmission of the blue light protective thin film at 400~800 nm

由图 4 可知，蓝光防护薄膜的测试曲线与理论设计曲线基本吻合。薄膜的光谱特性在 385~415 nm 的平均透过率小于 15%，实现高能短波深截止；在 415~445 nm 的平均透过率小于 50%，实现高能短波适当滤除；在 445~475 nm 的平均透过率大于 80%，保障了有益蓝光透射对节律调节的需要；在 475~800 nm 平均透过率大于 95%，满足了剩余可见光波段高透过率需要。

5 结 论

本文根据蓝光防护镜片及薄膜工业标准中 500~800 nm 波段高透过、400~450 nm 波段蓝光深截止的要求，提出了利用非线性玻尔兹曼函数拟合长波通薄膜结构的方法。结果表明，通过改进的非线性光谱目标值优化膜系结构，可以实现更好的光谱性能。对比线性和非线性仿真光谱分析结果可知，改进的目标值取值方法具有明显的斜率控制和通带波纹压缩特点。对比线性和非线性 500~800 nm 导纳轨迹可知，通带波纹压缩是由于平滑的非线性目标值曲线，特别是拐点处的目标值与光谱值差异性减少导致的。最后，采用电子束蒸发离子束辅助沉积镀膜方法，在 K_9 基片上成功制备了具有短波蓝光深截止及剩余可见光波段高透过率特性的蓝光防护功能薄膜。所制备的蓝光防护薄膜满足 GB/T38120—2019 要求。

参考文献：

[1] 杨超普, 方文卿, 王昭, 等. 不同显示器的蓝光危害及节律效应比较[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(12): 121701.
YANG CH P, FANG W Q, WANG ZH, *et al*.. Comparison on blue light hazard and circadian effect of different displays[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 121701. (in Chinese)

[2] 王晓瑜, 陈东川, 朱书贤, 等. 防蓝光显示技术进展[J]. 液晶与显示, 2020, 35(1): 1-11.
WANG X Y, CHEN D CH, ZHU SH X, *et al*.. Progress of anti-blue light hazard in display technology[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(1): 1-11. (in Chinese)

[3] 姜玉刚, 刘华松, 王利栓, 等. 卫星激光防护薄膜窗口的设计与制备技术研究[J]. 中国光学, 2019, 12(4): 804-809.
JIANG Y G, LIU H S, WANG L SH, *et al*.. Design and preparation technology of laser protective film window of satellite[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(4): 804-809. (in Chinese)

[4] 张忠义, 徐日宏, 张振华, 等. 防蓝光纳米薄膜的磁控溅射制备技术及性能研究[J]. 真空, 2017, 54(5): 35-38.
ZHANG ZH Y, XU R H, ZHANG ZH H, *et al*.. Study on preparation technology and properties of anti blue-light nano films by magnetron sputtering[J]. *Vacuum*, 2017, 54(5): 35-38. (in Chinese)

[5] 李候俊, 徐均琪, 王建, 等. 近红外激光薄膜滤光片的研制[J]. 光子学报, 2019, 48(9): 0931001.
LI H J, XU J Q, WANG J, *et al*.. Fabrication of near-infrared laser film filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(9): 0931001. (in Chinese)

[6] 宫大为, 付秀华, 耿似玉, 等. 红外双波段激光滤光膜的研制[J]. 中国光学, 2011, 4(3): 293-298.
GONG D W, FU X H, GENG S Y, *et al*.. Design and manufacture of infrared double waveband laser filter films[J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(3): 293-298. (in Chinese)

[7] 刘冬梅, 黄宏, 付秀华, 等. 深紫外全介质反射式滤光膜的研究[J]. 光子学报, 2018, 47(10): 1031002.

LIU D M, HUANG H, FU X H, *et al*.. Research of deep ultraviolet dielectric reflective filter film[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(10): 1031002. (in Chinese)

[8] 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.
TANG J F, GU P F, LIU X, *et al*.. *Modern Optical Thin Film Technology*[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. (in Chinese)

[9] 李资政, 杨海贵, 王笑夷, 等. 基于聚类全局优化算法的薄膜设计优化技术的研究[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0931001.
LI Z ZH, YANG H G, WANG X Y, *et al*.. Investigations of thin film design and optimization based on clustering and global optimization algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0931001. (in Chinese)

[10] 顾培夫, 陈海星, 艾曼灵, 等. TiO_2膜消光系数的确定及制备参量的影响[J]. 光学学报, 2005, 25(7): 1005-1008.
GU P F, CHEN H X, AI M L, *et al*.. Determination of the extinction coefficient of TiO_2 and effect of preparation parameters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(7): 1005-1008. (in Chinese)

[11] 袁文佳, 沈伟东, 郑晓雯, 等. 离子束溅射制备Nb_2O_5、Ta_2O_5和SiO_2薄膜的光学、力学特性和微结构[J]. 光学学报, 2017, 37(12): 1231001.
YUAN W J, SHEN W D, ZHENG X W, *et al*.. Optical and mechanical properties and microstructures of Nb_2O_5, Ta_2O_5 and SiO_2 thin films prepared by ion beam sputtering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(12): 1231001. (in Chinese)

[12] FANG M, HU D F, SHAO J D. Evolution of stress in evaporated silicon dioxide thin films[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(1): 119-122.

[13] 冯毓材, 冯隽, 刘强. 辅助镀膜用K系列强流宽束考夫曼离子源[J]. 激光与红外, 2006, 36(12): 1168-1170.
FENG Y C, FENG J, LIU Q. K series broad beam ion sources for the optical thin film assisted deposition[J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(12): 1168-1170. (in Chinese)

作者简介：

王雨思(1995—), 女, 天津人, 硕士研究生, 2018 年于中国石油大学(华东)获得学士学位, 主要从事颜色薄膜、光学薄膜的设计、制备与表征技术, 光学薄膜材料物理方面的研究。Email: 17854212425@163.com

卜轶坤(1979—), 男, 河北张家口人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 2007 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事结构色薄膜、光学防护薄膜设计、制备及应用等方面的研究。Email: buyikun0522@xmu.edu.cn

周贤建(1969—), 男, 福建三明人, 高级工程师, 1991 年于厦门大学获得硕士学位, 主要从事 PC 镜片设计、防蓝光防辐射镜片设计、制造及 PC 护目镜的研究开发。Email: roger@riccino.com.cn