

文章编号: 1005-5630(2025)06-0074-07

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.202409140089

高陡度宽透射二向色镜的研制

董明, 刘博文, 白皓宇, 黄宏宇, 林晓敏, 秦瑞, 黎冰, 陈静
(沈阳仪表科学研究院有限公司, 辽宁沈阳 110043)

摘要: 二向色镜是荧光检测光学系统中的重要光学元器件。基于拉曼检测、流式细胞仪等高端二向色镜应用需求, 设计了一种高陡度宽透射二向色镜。该二向色镜采用 Nb_2O_5 、 Al_2O_3 和 SiO_2 3种薄膜镀膜材料设计、制造, 采用带有全能型测量附件 (universal measurement accessory, UMA) 的 Cary 7000 完成光谱检测。该二向色镜平均透射率 $T_{\text{avg}} \geq 90\%$, 平均反射率 $R_{\text{avg}} \geq 98\%$, 陡度 (90% 透射沿与 2% 截止沿的过渡带) ≤ 7 nm, 透射带范围 > 300 nm。较相同膜层数量、厚度的两种材料制造的二向色镜, 由 3 种材料制造的二向色镜陡度提升了 3 nm 以上。结果表明, 基于 $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 3种薄膜材料镀制的高陡度宽透射二向色镜在膜系设计、制造工艺及光学性能等方面均获得了比较理想的效果。

关键词: 光学薄膜; 二向色镜; 高陡度; 宽透射; 薄膜材料
中图分类号: O 432 **文献标志码:** A

Development of high-steepness and wide-transmission dichroic mirror

DONG Ming, LIU Bowen, BAI Haoyu, HUANG Hongyu, LIN Xiaomin,
QIN Rui, LI Bing, CHEN Jing
(Shenyang Academy of Instrumentation Science Co., Ltd., Shenyang 110043, China)

Abstract: The dichroic mirror is a critical optical component in fluorescence detection systems. To meet the demands of high-end applications such as Raman spectroscopy and flow cytometry, a high-steepness wide-transmission dichroic mirror was designed and fabricated. This mirror utilized three thin-film coating materials, Nb_2O_5 , Al_2O_3 and SiO_2 , and was characterized using a spectrometer (Cary 7000) equipped with a universal measurement accessory (UMA). The dichroic mirror achieved an average transmission $T_{\text{avg}} \geq 90\%$, an average reflectance $R_{\text{avg}} \geq 98\%$, and a steepness ≤ 7 nm (the transition zone between the 90% transmission edge and the 2% cut-off edge). Its transmission band exceeded 300 nm. Compared to dichroic mirrors designed with the same number of layers and thickness but using only two materials, the three-material design improved steepness by more than 3 nm. The results demonstrate that the $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ multilayer coating effectively optimized the optical performance, achieving ideal outcomes in film design,

收稿日期: 2024-09-14

基金项目: 国家科技部创新方法工作专项 (2020IM010400)

第一作者: 董明 (1990—), 男, 工程师, 研究方向为光学薄膜技术。E-mail: dongming@hb-optical.com

manufacturing processes, and spectral characteristics.

Keywords: optical thin film; dichroic mirror; high-steepness; wide-transmission; thin film material

二向色镜的发展历程与光学技术、材料科学以及精密制造技术的进步,尤其是薄膜技术和镀膜技术的发展紧密相关。1953年,Widdop^[1]对早期二向色镜及其分光特性进行了总结,在热蒸发真空镀膜条件下,采用多层复合膜的形式来实现对特定波长光的反射和透射。随着真空镀膜技术的发展,1983年,Schiller等^[2]介绍了电子束蒸发沉积过程,并探讨了沉积速率对产品性能的影响。2000年,Wilden等^[3]提出了利用计算机软件理论模拟与辅助镀膜的设计,通过模拟影响微观结构相关参数来开发新型膜层结构。随着电子束蒸发、磁控溅射等精密镀膜技术的发展以及计算机控制能力的不断提升,二向色镜的设计和制造更加精确,能够更精准地控制反射和透射的波长范围,实现更复杂的光谱选择性,其性能得到了显著的提升。2009年,Grilli等^[4]提出一种用于UV固态激光器的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 和 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 二向色镜。多种镀膜材料的组合可以提升不同光谱区域所需的高透射率或高反射率,增强激光泵浦的功率效能,并具有较宽的可调谐性。2016年,庄秋慧等^[5]采用离子束辅助电子束成膜,用双重膜厚监控方法监控各膜层厚度,制备了 45° 入射、808 nm高反、1 064 nm高透的消偏振二向色镜,并将其用于全固态355 nm激光器。有关拉曼检测仪用干涉滤光片(简称拉曼滤光片)的研究,刘博文等^[6]在2023年开展了拉曼滤光片综合性的分析,包括二向色镜的使用环境和作用、光学特性、测试方法、生产工艺等方面的问题讨论。相较于传统测量仪器,用于拉曼检测中的二向色镜须具备更高的陡度,以便测量物质低波数特征峰,从而获得更多的物质信息的采集和判定。2025年,张静等^[7]基于光的干涉原理,开展了关于激光通信系统中高消光比二向色镜的研制,采用真空电子束蒸发离子辅助沉积技术,结合Light-ratio peak光值比例法监控膜层厚度,设计并优化光学监控策略,实现了膜厚度的精准控制。

相较于成熟的传统二向色镜研制,近年来高

端二向色镜发展研究进程较缓慢,因为其光学性能要求高,既要有高陡度又要有足够宽的透射区检测通道。本文研究并介绍了应用于多光源拉曼检测、多光谱流式细胞仪等终端应用的高陡度宽透射二向色镜滤光器件的膜系设计、镀制工艺、膜厚控制等方法与技术。

1 高陡度宽透射二向色镜参数设计

根据光的干涉作用原理,通过不同的光学薄膜设计方案可以实现不同的光学功能,这为许多光学仪器的特殊用途提供了实现机会。一般荧光检测系统由激发滤光片、发射滤光片、二向色镜这3种类型滤光片组成,用于分离激发光和发射光,如图1所示。为了增强荧光信号的检测能力,滤光片组的激发片和发射片的光谱位置应该更接近。提高二向色镜的陡度是增强检测光亮度的关键,同时保证透射区光谱范围足够宽则是满足特殊应用中更多检测通道的前提。图2所示为二向色镜光路结构示意图。

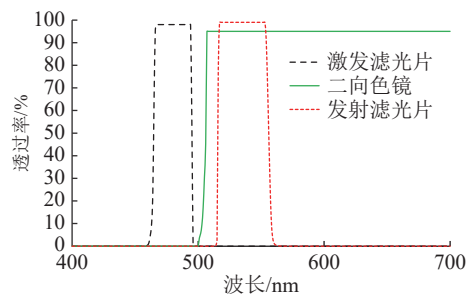


图1 荧光系统中的滤光片组

Fig. 1 The group of filters in a fluorescent system

通过分析多光源拉曼检测、多光谱流式细胞仪等高端二向色镜的应用需求^[8],提出了一种对应的高陡度宽透射二向色镜参数设计方案,并完成了膜系及工艺设计。基于等离子辅助反应磁控溅射技术制造的高性能二向色镜^[9],经验证可获得比较理想的应用效果。

通常二向色镜会被应用在 45° 入射的荧光系统中,传统薄膜会导致较大的偏振分离。这种偏

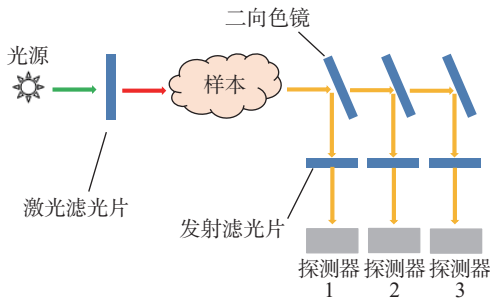


图 2 二向色镜光路结构示意图

Fig. 2 Light path of dichroic mirror structure

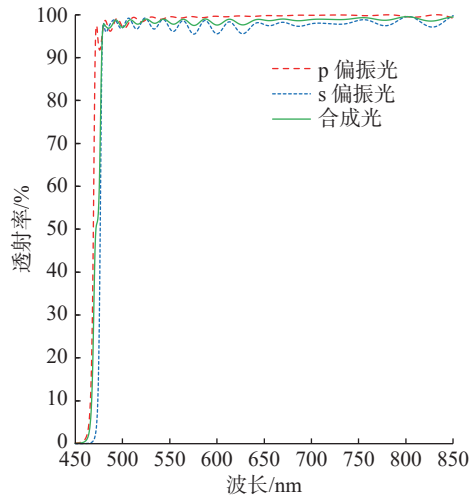
振分离方式会限制截止陡度的增加^[10-11]，因此实现更好的消偏振设计是本文研究的重点。二向色镜薄膜的设计常常基于干涉截止滤光膜理论。这种滤光片能在特定的波段产生高透过性，同时在该波段之外的其他指定波段产生较高的反射率或截止度。二向色镜薄膜通常采用两种高低折射率材料设计多层膜结构，以长波通、短波通或带通滤光膜为初始方案。根据光谱技术指标(如通带位置、截止陡度)，通过调整膜层厚度和折射率参数，匹配目标通带和截止特性，最终实现高陡度截止和消偏振效果。传统二向色镜薄膜的性能问题主要分为两类：一种是陡度低，消偏振较差，光谱透射区足够宽，如图 3(a)所示；另一种则是陡度高，消偏振较好，通带宽度较窄，如图 3(b)所示。

理论上，提高高折射率材料的折射率可增强二向色镜的截止陡度，但当前缺乏兼具高折射率与低色散特性的材料。因此，传统二向色镜无法满足高陡度宽透射的设计需求。本文提出了一种基于 3 种材料为结构界面的设计方法，在两种高低折射率材料为膜系结构界面设计的基础上介入一种中间折射率材料，通过调整设计结构来达到高陡度宽透射二向分色镜薄膜的技术指标。

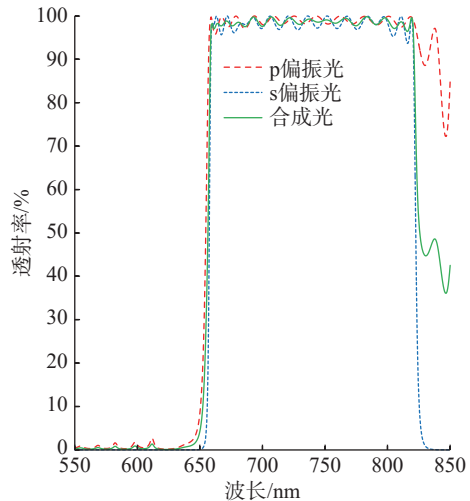
以长波通型二向色镜(dichroic mirror-long pass filter, DM-LP)为例，分析该类型滤光片的膜系设计方法、薄膜镀制工艺以及产品能达到的光谱效果。相关光谱设计参数见表 1。

2 膜料的选取

本文针对二向色镜消偏振膜系的研究，提出了一种采用高、中、低 3 种材料匹配的膜系结



(a) 陡度低、偏振效果一般,透射区范围较宽



(b) 陡度高、偏振效果好,透射区范围有限

图 3 传统二向色镜设计方案

Fig. 3 Traditional dichroic mirror design

表 1 高陡度宽透射二向色镜的设计参数

Tab. 1 Design parameters of high-steepness and wide-transmission dichroic mirrors

二向色镜	入射角度/(°)	$T_{avg}/\%$	$R_{avg}/\%$	陡度
DM-LP	45	≥ 90 (442~780 nm)	$\geq 98\%$ (400~435 nm)	≤ 7 nm

构，在角度效应下能够实现陡度高，低偏振分离度和宽透射带等特性^[12-13]。综合考虑膜料的光谱透过率，膜料间的应力匹配以及膜料的经济性，需要寻找一种合适的材料 M 作为中折射率材料。

该理论构建方法是，将物理厚度 d 作为传统膜系设计中唯一变量，引入一种中间折射率为 N_M 的材料，通过聚集密度模型来确定选定的高

折射率材料 H 和低折射率材料 L 的光学常数。通过整合中间折射率材料 M 的光学常数, 能够显著增强设计的灵活性。聚集密度公式为

$$N_M = PN_H + (1 - P)N_L \quad (1)$$

式中: N_M 、 N_H 和 N_L 分别为中间折射率、高折射率和低折射率材料的折射率; P 为比例系数。

采用等离子体辅助反应磁控溅射技术进行薄膜制备, 基于研究需求, 要求所选取的材料在 400~1 100 nm 波段吸收小、损耗低, 溅射状态稳定, 折射率变化范围小。一般选取 Nb_2O_5 和 SiO_2 作为高低折射率材料, 它们具有较好的光学性能和力学性能。有关材料选取的研究结果表明, 该理论构建方法同样适用于紫外、近红外等其他波段的应用, 具备较好的技术延展性。

根据高陡度宽透射二向分色镜镀制要求, 选取一种中折射率薄膜材料作为光学薄膜高折射率材料介入膜层, 通过材料折射率原理计算得到等效折射率。采用局部压强控制对高折射率材料进行溅射, 通过氧传感器 λ -sensor 调整氧气流量, 使靶材在过渡区到富氧区之间工作。低折射率材料 Si 更容易与氧气结合, 采用恒定功率的模式, 由两对靶材共溅射工作。采用 Nb_2O_5 和 SiO_2 两种薄膜材料进行膜系设计时未能达到设计需求, 因此在引入第 3 种折射率材料时, 要替换一对 Si 靶, 该材料必须与氧气有较强结合能力。通过调整溅射功率、离子源功率、沉积速率等方式实现第 3 种材料的稳定溅射。通过式(1)计算推导出最佳折射率 $N = 1.6 \sim 1.8$, 通过材料库寻找折射率匹配的材料。综合考虑后, 选取折射率 $N = 1.69$ 的薄膜材料 Al_2O_3 作为本研究薄膜制备中使用的第 3 种折射率材料。

3 膜系设计

对基于法布里-珀罗 (Fabry-Pérot cavity) 谐振腔结构的膜系而言, 其两个偏振分量的中心波长会在角度增加的过程中产生分散效应。随着分散程度加深, 合成光的透射波形会呈现下降趋势, 这主要是因为光在正面照射时, s 和 p 偏振光的等效折射率是一致的, 但随着入射角的增大, 薄膜对 s 和 p 偏振光会表现出不同的有效折

射率。随着膜系设计的角度增大, s 偏振光的高低折射率薄膜材料的等效折射率之比会大于 p 偏振光的, 因此 p 分量带宽增大, s 分量带宽减小, 从而产生偏振分离。

基于 3 种材料的光谱特性以及传统周期结构的设计特点, 膜系设计的基本膜系形式为

$$S | (\alpha L \beta M \theta H \beta M \alpha L)^n | A \quad (2)$$

式中: S 为 K9 玻璃; A 为空气; H 为高折射率材料; L 为低折射率材料; M 为适合的中间折射率材料; n 为迭代次数, 且 n 越大陡度越好; α 、 β 、 θ 为不同材料的匹配系数, 通过优化匹配系数可以调整消偏振度和透射谱带宽度。采用 Essential Macleod 软件进行膜系设计, 匹配合适的系数指标, 得到最终膜系形式 $S | (1.135L0.856M2.28H0.856M1.135L)^{22} | A$ 。同时, 结合共轭梯度优化算法得到最终膜系: 膜系第一面为功能膜面, 膜层数 92 层, 物理厚度 13.4 μm ; 膜系第二面为增透膜面, 膜层数 10 层, 物理厚度 0.6 μm 。设计达到的光谱曲线如图 4 所示, 分别为 p 偏振光、s 偏振光和合成光曲线。

本文采用膜系设计方案中的二向色镜有效解决了偏振分离的设计难题, 在满足 300 nm 光谱透射区条件下, 该设计方案较传统的两种材料的膜系设计指标, 截止陡度提高了 3 nm 以上, 能很好地满足应用需求。

4 薄膜制备

在薄膜制备过程中, 3 种不同折射率材料在膜层匹配和工艺控制上难度较大, 任一膜层的厚度偏差都会影响产品的整体光学性能。针对上述高陡度宽透射二向色镜膜系, 采用 Essential Macleod 软件进行了误差模拟运算^[14], 模拟结果如图 5 所示。模拟结果表明, 要实现该膜系工艺, 膜层厚度的控制精度需达到 0.2% 以上, 即每层膜的厚偏差应小于 0.5 nm (膜系设计的最大膜层厚度为 226 nm)。受限于膜层层数和镀膜精度, 离子辅助的蒸发设备难以满足镀制要求。

采用 Helios 800 等离子体辅助反应磁控溅射 (plasma assisted reactive magnetic sputtering, PARMS) 工艺进行镀制^[15-16]。这是一种中频孪生

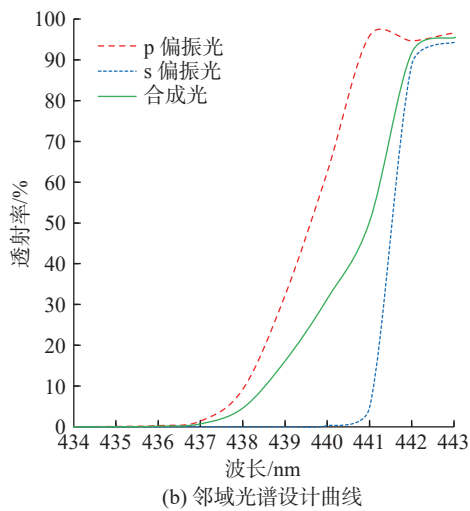
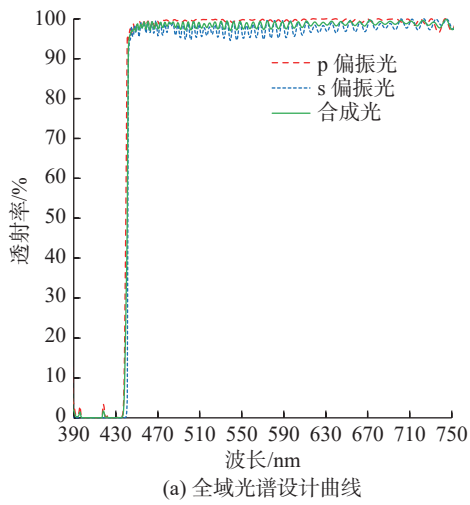


图 4 高陡度宽透射二向色镜透射率设计曲线
Fig. 4 Transmission design of high-steepness and wide-transmission dichroic mirror

靶反应磁控溅射与电子回旋波共振 (electron cyclotron wave resonance, ECWR) 辅助沉积相结合的溅射镀膜技术^[17], 并配有光学表面监测系统 (optical surface monitoring system, OSMS)^[18] 以实现膜系的精准膜厚控制和稳定沉积镀膜。通过离子源发射氧离子来进一步氧化, 确保得到完全氧化的、无吸收的薄膜。

膜系设计中的中间折射率材料为铝靶, 该材料与氧气结合能力较强。在反复实验过程中, 铝靶溅射形成 Nb_2O_5 膜层, 下一个衔接层为铝靶溅射膜层。其与氧气的特异性结合能力不但能通过氧离子进一步氧化, 同时还能剥夺 Nb_2O_5 膜层的氧离子, 使 Nb_2O_5 膜层失氧吸收, 导致镀制样品因吸收产生透射率低的现象。该样品光谱平

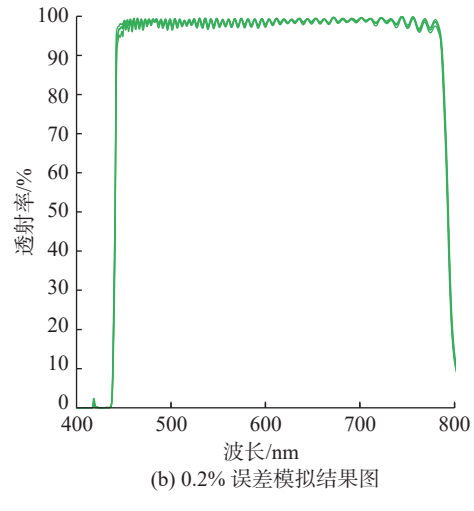
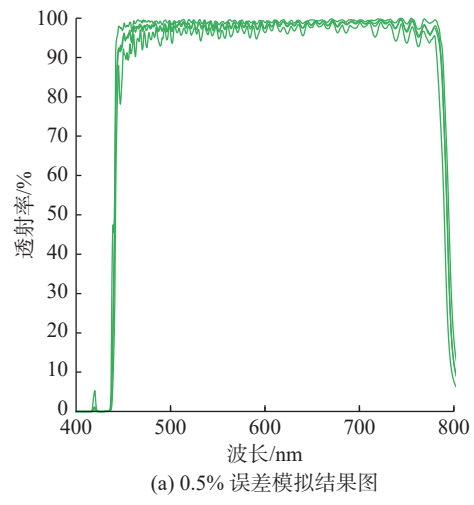


图 5 高陡度宽透射二向色镜的 0.5% 和 0.2% 误差的模拟效果
Fig. 5 0.5% and 0.2% error simulation of high-steepness and wide-transmission dichroic mirror

均透射率仅达到 83%, 如图 6 所示, 图中红色虚线为透射率为 80% 的示意线。

通过降低 Al_2O_3 膜层充氧量及沉积速率, 能消除 Al 离子对 Nb_2O_5 膜层氧离子的夺取, 工艺参数如表 2 所示。

通过对光控系统 (OMS 5000) 的光学干涉镀膜来直接监控工艺研究^[19], 可实现最高 0.1 nm 的精度控制, 满足本文设计的制备要求。采用光控系统工艺模拟软件 OMS-TOMS 模拟制备过程, 验证所设计的镀膜工艺方案可行性。图 7 所示为高陡度宽透射二向色镜膜系的 OMS-TOMS 模拟镀膜误差结果。多次模拟结果表明, 各层误差均控制在 $\pm 0.2\%$ 以内, 镀膜工艺方案达到镀制要求。

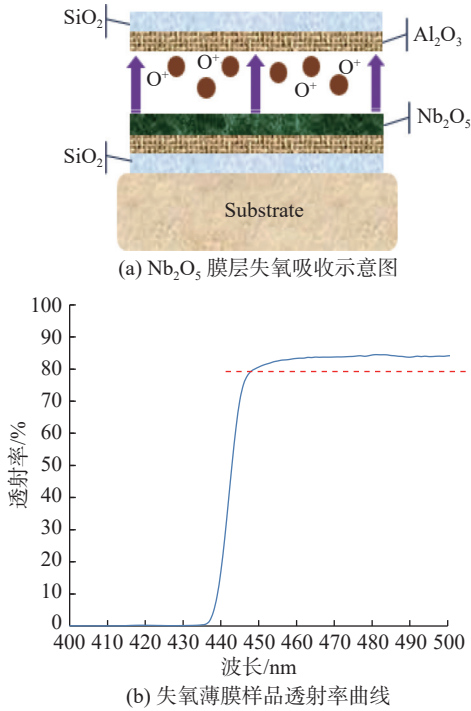


图 6 Nb₂O₅ 膜层失氧吸收示意图及透射率曲线
Fig. 6 Oxygen loss absorption diagram of Nb₂O₅ film and transmittance curve

5 镀制结果

采用带有全能型测量附件(universal measurement accessory, UMA)的分光光度计(Cary 7000, 安捷伦)测试实验样品薄膜, 光谱测试参数如表 3 所示。镀制的二向色镜 DM-LP 测试结果如图 8 所示。通带的平均透射率 $T_{avg} > 93\%$

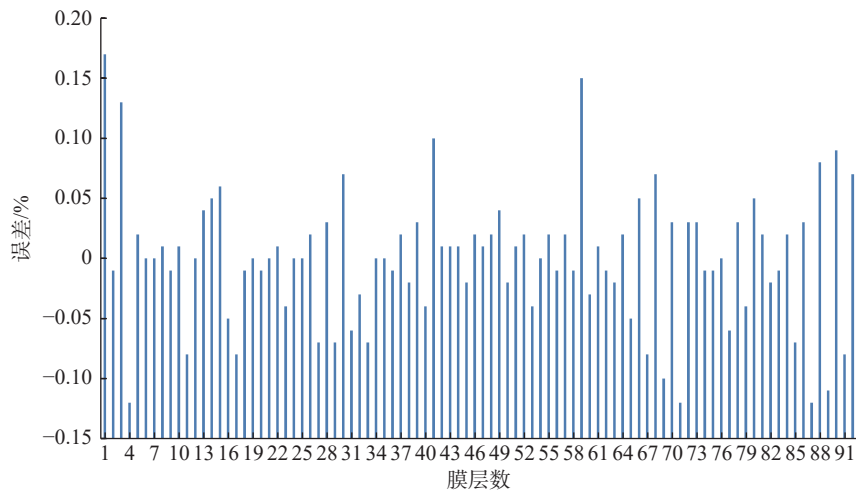


图 7 OMS-TOMS 模拟的镀膜误差
Fig. 7 Layer thickness errors simulated by OMS-TOMS

表 2 光学薄膜沉积工艺参数
Tab. 2 Optical thin film deposition process parameters

材料	沉积速率/ (nm·s ⁻¹)	温度 控制/℃	控制方式	氧气流量/ (mL·min ⁻¹)	氩气流量/ (mL·min ⁻¹)
Nb ₂ O ₅	0.49	150	λ- sensor	42	30
SiO ₂	0.50	150	恒功率	6	25
Al ₂ O ₃	0.50	150	恒功率	6	25
Al ₂ O ₃ (Nb ₂ O ₅ 膜层后 衔接层)	0.15	150	恒功率	3	25

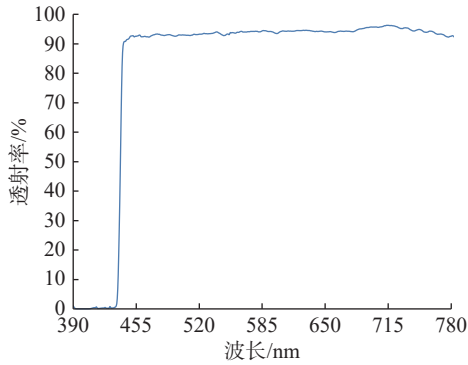
(442~780 nm), 平均反射率 $R_{avg} > 99\%$ (400~435 nm), 截止陡度(90%透射沿与2%截止沿的过渡带) ≤ 7 nm, 所有光谱指标均到达了设计预期。

6 结 论

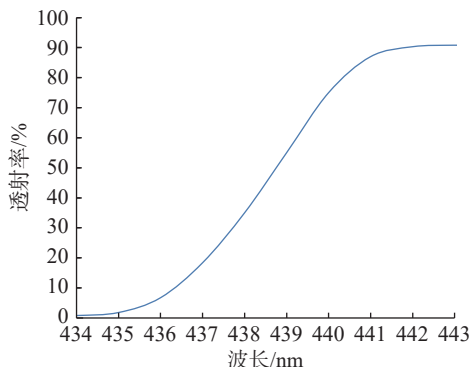
本文分析了基于多光源拉曼检测、多光谱流式细胞仪等领域的光路系统, 通过材料特性分析及折射率适应性研究, 提出了联用 3 种不同折射率薄膜材料设计的 7 nm 高陡度宽透射二向色镜的参数设计方案, 并以 DM-LP 为例, 介绍了膜系设计方案和薄膜镀制工艺。结果表明, 采用 PARMs 工艺镀制的二向色镜实验样品可以实现 7 nm 高陡度和 300 nm 宽透射兼得的光谱效果, 其光学性能达到设计要求, 3 种不同折射率薄膜

表 3 两种类型二向色镜的分光光度计测试参数
Tab. 3 Test parameters of two types of dichroic mirrors on the spectrophotometer

二向色镜	积分时间/s	取点间隔/nm	狭缝宽度/nm
高陡度二向色镜	1	0.5	1
常规二向色镜	0.2	1	2



(a) 全域光谱曲线



(b) 邻域光谱曲线

图 8 实验样品光谱曲线

Fig. 8 The spectral curve of experimental sample

材料的镀制工艺可以实现稳定沉积，相关系列产品经试用后获得了令人满意的实际应用效果。

参考文献:

[1] WIDDOP M E. Review of work on dichroic mirrors and their light-dividing characteristics[J]. *Journal of the Society of Motion Picture and Television Engineers*, 1953, 60(4): 357 – 366.
[2] SCHILLER S, JAESCH G, NEUMANN M. High rate electron beam evaporation[J]. *Thin Solid Films*, 1983, 110(2): 149 – 164.
[3] WILDEN J, FRANK H, MÜLLER T. Computer aided coating design[C]//ITSC 2000. Montreal: ASM International, 2000: 211 – 217.

[4] GRILLI M L, MENCHINI F, PIEGARI A, et al. Al₂O₃/SiO₂ and HfO₂/SiO₂ dichroic mirrors for UV solid-state lasers[J]. *Thin Solid Films*, 2009, 517(5): 1731 – 1735.
[5] 庄秋慧, 刘国军, 付秀华, 等. 用于 355nm 紫外激光器的消偏振二向色镜 [J]. *光子学报*, 2016, 45(7): 0731001.
[6] 刘博文, 高鹏, 王瑞生, 等. 拉曼检测仪器用干涉滤光片综述 [J]. *真空*, 2023, 60(6): 37 – 41.
[7] 张静, 朱涛, 付秀华, 等. 激光通信系统中高消光比偏振分光镜的研制 [J]. *中国激光*, 2025, 52(1): 0103102.
[8] 李灿, 郭帮辉, 孙竹. 多光谱消色差成像流式细胞仪的光学系统设计 [J]. *光学学报*, 2016, 36(9): 0922002.
[9] 付秀华, 刘俊岐, 李卓霖, 等. 大口径超薄基板双面溅射膜厚均匀性研究 [J]. *光子学报*, 2023, 52(6): 0631001.
[10] 阴晓俊, 王瑞生, 赵帅锋, 等. 超锐截止生物学滤光片的研制 (特邀)[J]. *光子学报*, 2022, 51(9): 0951602.
[11] 张丽敏, 刘涵, 尹国艳, 等. 面向荧光剂药代动力学的动态扩散荧光层析系统 [J]. *光子学报*, 2019, 48(6): 0611002.
[12] 陈卫斌, 顾培夫. 用于投影显示的分色合色膜系的消偏振设计 [J]. *光子学报*, 2005, 34(6): 869 – 872.
[13] 聂明局, 刘德明. 倾斜入射薄膜滤光片偏振控制的优化算法 [J]. *光子学报*, 2009, 38(8): 2015 – 2018.
[14] MACLEOD A, CLARK C. Optical coating design with the essential Macleod[R]. Tucson: Thin Film Center Inc. , 2012.
[15] KIM T H, YEOM G Y. A review of inductively coupled plasma-assisted magnetron sputter system[J]. *Applied Science and Convergence Technology*, 2019, 28(5): 131 – 138.
[16] VEMPAIRE D, MIRAGLIA S, PELLETIER J, et al. Structural and magnetic properties of Ni₃N synthesized by multidipolar microwave plasma-assisted reactive sputtering[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 480(2): 225 – 229.
[17] RAO S G, SHU R, BOYD R, et al. Plasma diagnostics and film growth of multicomponent nitride thin films with magnetic-field-assisted-dc magnetron sputtering [J]. *Vacuum*, 2022, 204: 111331.
[18] PLACIDO F, GIBSON D, WADDELL E, et al. Characterisation of optical thin films obtained by plasma ion assisted deposition[C]//Proceedings of SPIE 6286, Advances in Thin-Film Coatings for Optical Applications III. San Diego: SPIE, 2006: 628602.
[19] LAPPSCHIES M, GROSS T, EHLERS H, et al. Broadband optical monitoring for the deposition of complex coating designs[C]//Proceedings of SPIE 5250, Advances in Optical Thin Films. St. Etienne: SPIE, 2004: 637 – 645.

(编辑: 李晓莉)