

光学膜厚直控系统光路优化设计与信号增强技术研究

谷培兵 付秀华 董所涛 李治 张佳明 谢海峰 王世武

Research on optical path optimization design and signal enhancement technology for direct optical film thickness control systems

GU Peibing, FU Xiuhua, DONG Suotao, LI Zhi, ZHANG Jiaming, XIE Haifeng, WANG Shiwu

引用本文:

谷培兵, 付秀华, 董所涛, 李治, 张佳明, 谢海峰, 王世武. 光学膜厚直控系统光路优化设计与信号增强技术研究[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2025-0153

GU Peibing, FU Xiuhua, DONG Suotao, LI Zhi, ZHANG Jiaming, XIE Haifeng, WANG Shiwu. Research on optical path optimization design and signal enhancement technology for direct optical film thickness control systems[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2025-0153

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0153>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

变量耦合动态监控光学膜厚补偿技术

Variable coupling dynamic monitoring and compensation technology of optical film thickness

中国光学 (中英文). 2025, 18(3): 467 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0174>

光子集成干涉阵列视场拼接子孔径光路设计

Photonic-integrated interferometric array field-of-view splicing subaperture optical path design

中国光学 (中英文). 2024, 17(6): 1458 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0030>

光纤光栅外腔激光器光学薄膜的研制

Design and fabrication of an optical film for fiber bragg grating external cavity diode lasers

中国光学 (中英文). 2023, 16(2): 447 <https://doi.org/10.37188/CO.EN.2022-0010>

六边形环带排布的共光路复眼光学系统设计

Design of compound eye optical system with hexagonal band arrangement and common optical path

中国光学 (中英文). 2023, 16(1): 158 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0116>

纸膜双层缺陷检测的视觉成像光场设计

Design of optical field of vision imaging for defect detection of paper and transparent film

中国光学 (中英文). 2024, 17(2): 354 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0134>

基于Philips棱镜3CMOS相机的光学设计及其光谱优化

Optical design and spectral optimization of Philips prism 3CMOS camera

中国光学 (中英文). 2024, 17(3): 648 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0155>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-11

光学膜厚直控系统光路优化设计与 信号增强技术研究

谷培兵^{1,2}, 付秀华^{1,2*}, 董所涛^{2,3}, 李 治^{1,2}, 张佳明^{1,2}, 谢海峰⁴, 王世武^{5,6}

(1. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 长春理工大学中山研究院, 广东 中山 528436;

3. 广东长理精讯光电科技有限公司, 广东 中山 528436;

4. 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094;

5. 山东大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100;

6. 青岛海泰光电技术有限公司, 山东 青岛 266100)

摘要:随着光电技术的发展, 光学薄膜广泛应用于军事、医疗、通信等领域, 膜层厚度是决定其光学性能的关键参数, 膜厚监控系统的精度直接影响光谱性能。针对直控式光学膜厚监控系统光源发散、探测器响应信号弱的波段引起厚度控制误差大的问题, 本文提出将光信号发射与接收端均放置在真空腔外, 避免腔室的振动、温度、装配等对光信号的干扰, 基于光纤耦合与准直聚焦的光信号调制方案, 通过将光源外置并集成化设计, 结合多模光纤与复合光路系统, 利用 Zemax 软件以监控镜片和光纤接收端面的光斑尺寸及能量密度为目标, 优化光信号发射和接收端光学系统元件的参数, 提高光信号及电信号的稳定性。改进后光纤接收端辐照强度提升 222.7%, 信号强度提升 156.6%, 信噪比提高 70.38%。通过制备波长 2400 nm、半高宽 40 nm 的窄带滤光膜, 重复制备三次中心波长偏移在 1 nm 以内, 半带宽均为 40 nm。从而验证该系统在探测器响应信号弱的波段实现高精度、高稳定性膜厚监控。

关键词: 光学薄膜; 光学膜厚监控; 光纤耦合; 光路设计; 光信号调制

中图分类号: 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2025-0153 CSTR: 32171.14.CO.2025-0153

收稿日期: 2025-12-05; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 中山市引进创新团队项目 (No. CXTD2023008)、中山市社会公益科技研究项目 (No. 2024B2044)

Supported by introducing innovative new team projects in Zhongshan City (No. CXTD2023008); Zhongshan Social Public Welfare Science and Technology Research Project (No. 2024B2044)

Research on optical path optimization design and signal enhancement technology for direct optical film thickness control systems

GU Peibing^{1,2}, FU Xiuhua^{1,2*}, DONG Suotao^{2,3}, LI Zhi^{1,2}, ZHANG Jiaming^{1,2}, XIE Haifeng⁴, WANG Shiwu^{5,6}

(1. College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Zhongshan Research Institute, Changchun University of Science and Technology, Zhongshan 528436, China;

3. Guangdong Changli Jingxun Optoelectronics Technology Co., Zhongshan 528436, China;

4. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

5. School of Information Science and Engineering, Shandong University, Shandong 210094, China;

6. Qingdao Hitek Photonics Co., Ltd, Shandong 210094, China)

* Corresponding author, E-mail: goptics@126.com

Abstract: With the advancement of photoelectric technology, optical films are extensively employed in military, medical, and communication fields. Film thickness is a critical parameter that determines optical performance, and the accuracy of its monitoring system directly affects spectral characteristics. To mitigate the significant thickness control errors in conventional direct monitoring systems—caused by light source divergence and weak detector response signals—this paper proposes an externalized optical configuration. In this design, both the optical transmitter and receiver are placed outside the vacuum chamber, thereby avoiding interference from chamber vibration, temperature variations, and assembly inconsistencies. Additionally, an optical signal modulation scheme based on fiber coupling and collimation-focusing is introduced. By adopting an external integrated light source combined with multimode optical fibers and a composite optical path, and by optimizing component parameters through optical simulation to improve spot quality and energy density, the stability of both optical and electrical signals is enhanced. After optimization, irradiance at the fiber receiving end increased by 222.7%, signal strength by 156.6%, and the signal-to-noise ratio by 70.38%. The system's performance was validated by preparing a narrowband filter film with a center wavelength of 2400 nm and a bandwidth of 40 nm, achieving a wavelength deviation within 1 nm over three repeated tests while consistently maintaining the 40 nm bandwidth. These results confirm that the system enables high-precision and stable film thickness monitoring even in spectral bands with weak detector response.

Key words: Optical films; optical film thickness monitoring; fiber coupling; optical path design; optical signal

1 引 言

在光学薄膜的精密制备过程中,膜厚监控系统是确保膜层厚度精准控制的重要环节,其性能直接决定了薄膜的光谱特性与制备的重复性。其中,光学监控法因其控制精度高、可实时反映膜厚的光谱信息等优势,已成为高精度镀膜的核心

技术^[1-9]。然而,监控系统的性能不仅依赖于信号采集与处理算法,在很大程度上受前端光路系统性能的制约。光源的稳定性、光束的准直性、能量传输效率以及信号的信噪比等,均与光路结构密切相关。尤其在窄带滤光膜、多层干涉滤光膜等高精度器件的制备中,微小的光能量波动或光束偏移都会导致光谱监控判停误差,造成中心波长偏离或半带宽超差^[10-16]。因此,构建高稳定性、

高准直度的光学传输路径, 实现光信号的均匀照度、低损耗传输与高效耦合, 是提升膜厚监控精度的必要条件。

国外部分企业已实现对光学膜厚的自动控制, 德国 Leybold 公司配备的光学膜厚监控系统 WBM-1000 监控精度可达 0.025% 左右, 该公司生产的另一型号 OMS5000 系统, 其精度可达到 0.020%, 稳定性为 0.500% 左右; 日本 Oporun 公司生产的光学膜厚监控系统 HOM1-1 的监控精度为 0.010%, 350~2400 nm 宽波段 HOM2-RT-S1 的监控精度为 0.050%; Shincron 公司目前研发的 HOM 和 TOP 膜厚监控系统监控精度可达 0.010% 左右。

国内近年来也开展了对光学膜厚监控系统的研究, 2022 年华中科技大学陈鸿飞通过设计线性照射装置和高光谱成像模块的探测光路, 使光强波动在 10% 以内, 提高了光源稳定性; 2023 年长春理工大学董所涛等研制了监控可见中红外波段的光学膜厚监控系统, 结合准直光路系统提高了光信号强度, 光源稳定性可达 0.001%; 2024 年长春理工大学谢海峰等通过采用非球面 U 型反光镜结构和自由曲面透镜, 实现了发散光源的准直以及光信号聚焦与光纤耦合, 将直接式光学膜厚监控系统的信号幅值提升 147%。

本文针对现有光路反光杯和会聚透镜组合的系统存在装配定位误差大, 加工难度高的问题, 以及镀膜过程中温度对光源稳定性造成的影响, 采用外置光源集成设计和光纤耦合光路系统优化, 系统性提升光信号强度和信噪比, 从而增强膜厚监控的稳定性与可靠性。

2 直接式光学膜厚监控系统原理

光学膜厚监控系统如图 1 所示。卤素灯发出的光信号经准直透镜汇聚后, 经过监控片、视窗玻璃、汇聚透镜, 进入到光纤, 由光纤导入到单色仪中, 探测器将光信号转换为电信号后, 经低通滤波器、跨阻放大器、数据采集卡处理后输出到计算机中, 计算机对采集到的光学监控信号进行分析处理后实现对透过率的在线监控, 监控波长范围覆盖 400~2400 nm。

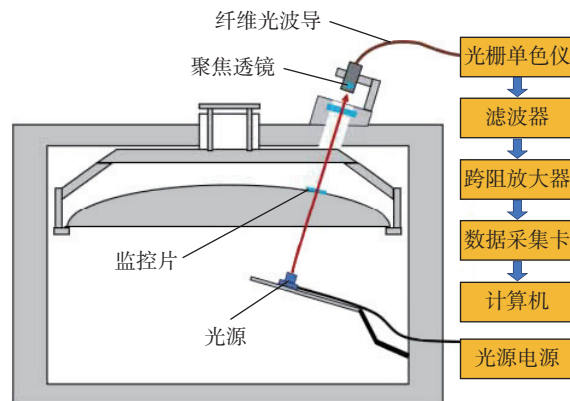


图 1 直控式光学膜厚系统框架简图

Fig. 1 Principle of direct optical film thickness system

传统的透过率计算方法是计算监控镜片与通孔的光亮值比值, 本文通过增加暗点光亮值的方式来减少信号干扰, 利用伞架旋转进行光信号调制, 光信号在经过监控镜片、暗点和通孔后, 被调制成具有一定频率的脉冲光, 如图 2 所示, 透过率计算为:

$$T = \frac{L_1 - L}{L_2 - L}, \quad (1)$$

其中, L_1 是监控镜片光亮值, L_2 是通孔光亮值, L 是伞架暗点光亮值。

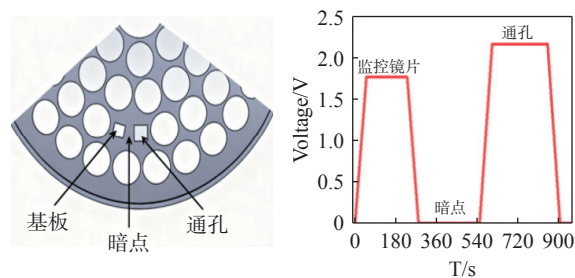


图 2 工件盘开孔及调制信号采样示意图

Fig. 2 Schematic of the Substrate Holder Aperture and Modulated Signal Sampling

从图 1 可见, 光源固定于补偿板上方, 镀膜时腔体烘烤温度较高, 加上腔体振动以及离子源工作的电磁脉冲会直接传递至光源等固定结构, 引起光束指向性抖动, 产生低频闪烁噪声, 会导致输出的光信号不稳定。另外, 光源的对准精度受限于真空腔体空间距离, 且任何更换或维护均需打开真空室进行操作, 导致停机时间长、运维成本高。因此, 规避上述干扰因素, 提高光信号强度和稳定性以及膜厚监控精度是行业内亟待解决的问题。

3 光学膜厚监控系统的设计优化

3.1 直控式光学膜厚监控系统的改进

为了提高监控系统精度,对整体硬件和光路进行优化设计,改进后直控式光学膜厚监控系统结构如图3所示。

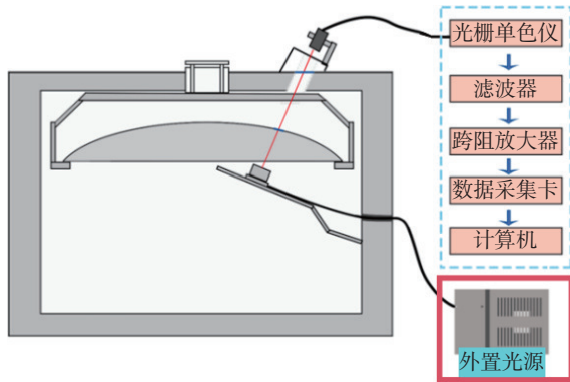


图3 新直控式光学膜厚监控系统结构简图

Fig. 3 Structural Schematic of the Proposed Direct-Monitoring Optical Film Thickness System

改进的光路系统如图4所示,主要由光源、准直光路系统和光纤接收端三部分构成。投光器置于真空腔室外部,其发出的光经透镜组耦合进入光纤,光纤将光信号引入腔体中,光信号被反射镜折转至会聚透镜聚焦于监控镜片上,透过监控镜片和视窗玻璃后在接收端再次耦合进入光纤,最终传输至信号处理系统。

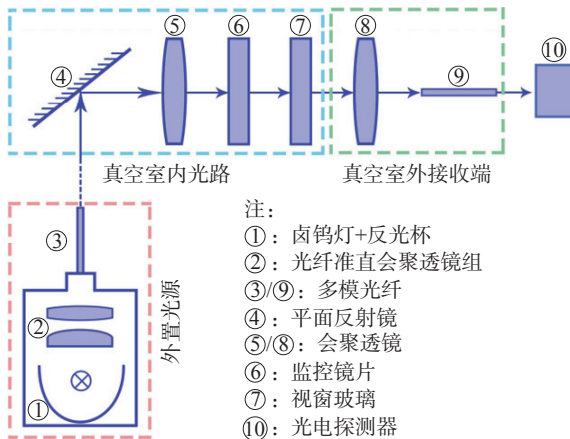


图4 光路系统原理

Fig. 4 Schematic of the Optical Path System

根据光纤耦合和探测器的性能参数,准直聚焦耦合光路在设计时需满足下列关键指标,才能保证光信号的有效传输,具体见表1所示。

表1 光路系统优化关键指标

Tab. 1 Key Indicators for Optical Path System Optimization

系统参数	数值
光纤出射端-监控镜片距离/mm	$20 \leq L \leq 40$
光纤数值孔径角	0.22
光纤接收端光斑直径/mm	1.2
光强均匀性	$RSD \leq 10\%$
透镜中心厚度/mm	≥ 0.8

3.2 光源外置与耦合系统设计

为了满足系统所需的宽光谱要求,本文选用型号 HLX64623 的 DHOM 灯,光源发散角为 160° ,光谱范围 400–2400 nm,色温 3300 K。图5为光源光谱图,图中色柱的颜色分别代表可见光和红外光,黑色代表人眼看不到的红外光线。

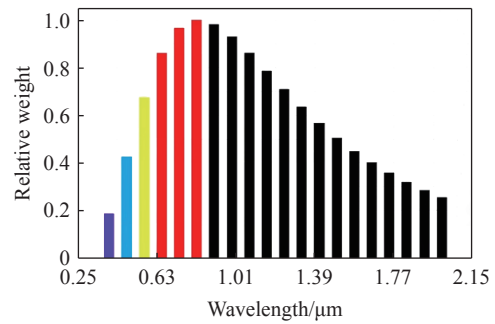


图5 光源光谱图

Fig. 5 Light source spectrum

为了提高光信号的强度,解决卤钨灯因其发光面尺寸和光束发散角大,导致其与多模光纤在空间与角度上存在严重失配的问题,将光源能量最大限度与光纤耦合,设计并搭建了准直聚焦光路系统,光纤选用阶跃型多模光纤,具体参数见表2。

表2 阶跃型多模光纤参数

Tab. 2 Parameters of Multimode Optical Fibers

参数	名称/数值
芯层材料	纯石英
包层材料	F掺杂石英
芯层直径/ μm	200 ± 5.0
包层直径/ μm	220 ± 6.0
折射率结构	阶跃型
数值孔径/NA	0.22 ± 0.02
工作波长范围/nm	400–2400

首先利用准直透镜将发射的光源转化为平行的准直光束, 然后通过会聚透镜将光束会聚于光纤端面。另外, 使用抛物面反光杯将光源向后发射的光线有效反射并汇聚至出光方向, 从而提高系统的整体光通量。该反光杯面型为标准抛物面(圆锥系数为-1), 曲率半径为 12 mm。

在 Zemax 软件中, 将准直和汇聚透镜的曲率半径、间距及圆锥系数进行优化, 在出射光纤端面设置单点探测器, 以其接收光通量最大化为目标函数, 采用锤形优化算法, 反复迭代, 同时约束透镜中心厚度等参数以确保器件的可加工性。优化后准直聚焦系统光学元件参数见表 3 所示。

优化前后光纤出射端的辐照强度(单位面积

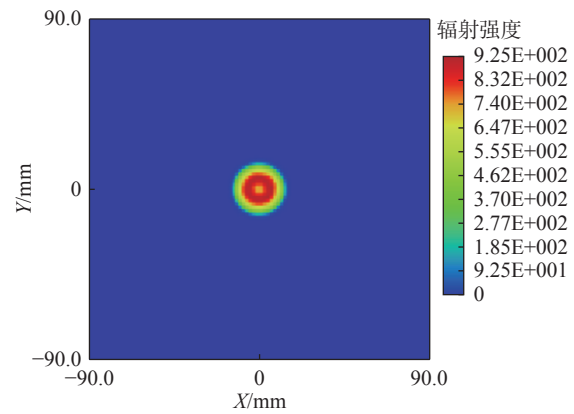
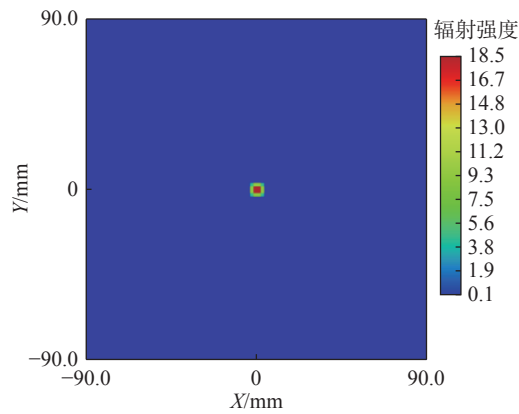


图 6 优化前(左)、优化后(右)光纤入射端辐射强度

Fig. 6 Radiance at the Fiber Input End Before (Left) and After (Right) Optimization

3.3 真空室内准直聚焦系统的设计

光纤将光信号传输到真空室固定于修正板并随其升降, 光纤的弯曲会导致传输效率下降, 根据光纤传输理论, 当光纤弯曲时, 沿曲率半径方向产生能量辐射, 部分原光波导中的约束光将转化为泄露模与折射模, 从而形成宏弯损耗与微弯损耗。经过分析, 本文的光纤传输损耗以宏弯损耗为主(简称弯曲损耗), 主要由空间滤波效应、模式泄露及模式耦合引起, 其中空间滤波效应为主导因素, 多模光纤弯曲损耗的计算公式为:

$$\alpha = \frac{T}{2R} \exp \left[2Wa - \frac{2W^2}{3\beta R} \right], \quad (2)$$

其中,

$$T = \frac{2ak^2}{e^{\nu} \pi W V^2}, \quad (3)$$

$$W^2 = \beta^2 - n_2^2 k_0^2 \quad (4)$$

能量)如图 6 所示, 可以看出, 中心辐照强度由 17.1 W 增强至 9.25×10^2 W, 进入光纤的总光能量提升了 54 倍。

表 3 优化后准直聚焦系统参数

Tab. 3 Parameters of the optimized collimation and focusing system

	准直透镜	会聚透镜
材质	BK7	F9
直径/mm	30	28
曲率半径/mm	$r_1=55, r_2=40$	$r_1=r_2=50$
中心厚度/mm	4.2	3.6
焦距/mm	76	58

$$V^2 = \alpha^2 k_0^2 (n_1^2 - n_2^2) \quad (5)$$

式中 α 为纤芯半径, R 为光纤弯曲的曲率半径, β 为传播常数, n_1 、 n_2 分别为光纤纤芯和包层的折射率。从上式可以看出多模光纤弯曲调制引起的损耗依赖于弯曲半径。因此, 为避免光纤产生过多弯曲损耗, 设计了如图 5 所示包含反射镜、光纤准直透镜和光纤聚焦透镜的光路系统, 通过改变光纤传输光信号的方向, 反射和会聚透镜组将光纤出射端的光进行调制使其能够与监控镜片准直。优化后光学系统参数见表 4 所示。

表 4 腔室内部光学系统参数

Tab. 4 Initial structural Parameters of the lens

	反射镜	会聚透镜
材质	紫外熔石英	紫外熔石英
直径/mm	25	31
曲率半径/mm	平面	$r_1=r_2=65$

续表 4

	反射镜	会聚透镜
中心厚度/mm	4	4
焦距/mm	/	72

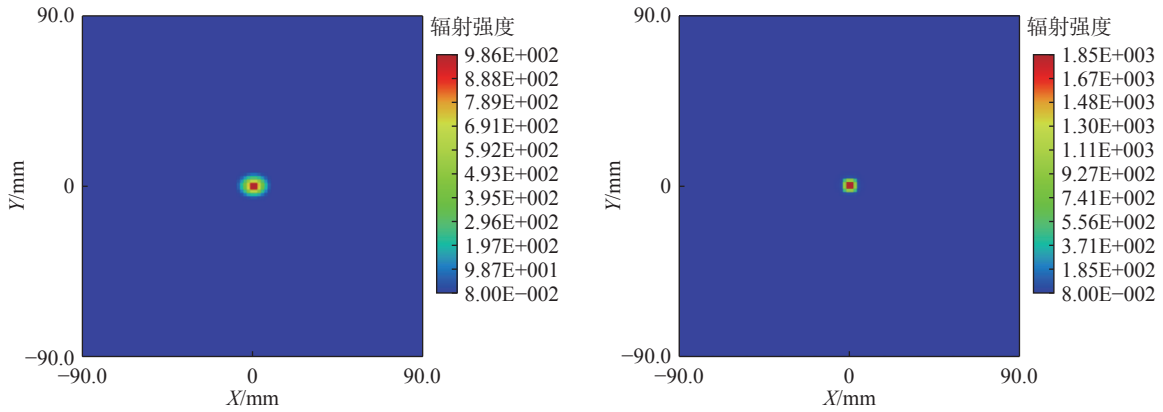


图 7 优化前(左)、优化后(右)监控镜片接收辐射强度

Fig. 7 Radiance at the Receiving End of the Monitoring Lens Before (Left) and After (Right) Optimization

3.4 光纤接收端光路系统设计

光信号从视窗出射,由会聚透镜耦合至光纤并传入单色仪进行分光与光电转换,光信号的强度影响探测器的响应幅值与系统信噪比,而光斑的均匀性则影响探测器不同像素单元的响应一致性,会在后续信号处理中被放大,成为系统误差的来源,最终影响膜厚监控的精度。

在接收端为了获得高能量分布均匀的光信号,利用 Zemax 软件,采用物理光学传播模型对光纤出射端的光信号传输性能进行优化设计,会

通过仿真模拟监控镜片接收光的辐射强度,如下图 7 可得监控镜片接收辐照强度由 9.86×10^2 W 提升为 1.85×10^3 W,强度提升了 187.6%,光斑大小由 12 mm 缩小至 5.3 mm。

聚透镜参数见表 5。

表 5 接收端会聚的双凸透镜参数

Tab. 5 Parameters of the converging lens at the receiving end

材质	直径/mm	曲率半径/mm	中心厚度/mm	焦距/mm
BK7	30	$r_1=r_2=60$	4	65

光纤接收端接收辐照强度如图 8 所示,光斑直径大小由 2 mm 缩小至 1.2 mm,增加会聚透镜后光纤接收端辐照强度由 90.4 W 提高到 201.3 W。

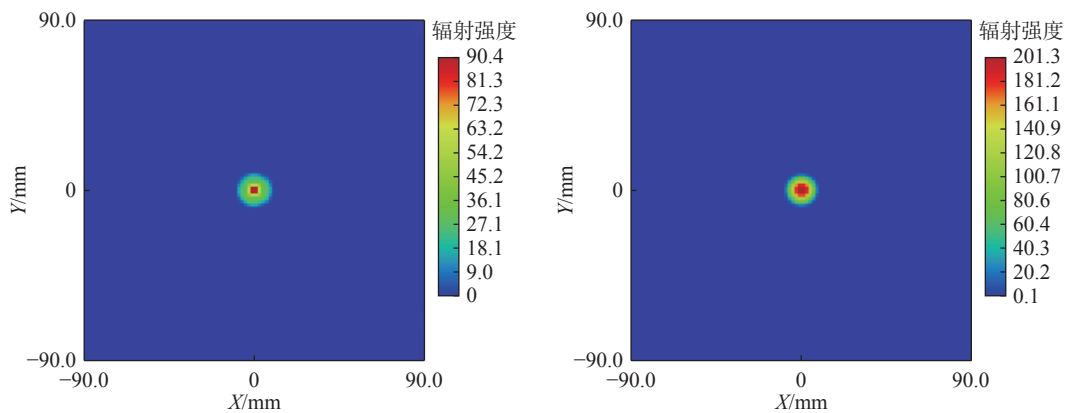


图 8 增加会聚透镜前(左)、后(右)光纤出射端接收辐照强度

Fig. 8 Irradiance at the Fiber Output End Before (Left) and After (Right) Adding the Converging Lens

针对探测器入口狭缝(宽度 0–3 mm 连续可调,长度 1.2 mm)范围内的光斑辐照强度分布进

行了仿真分析。结果(图 9)表明,在该狭缝限定区域内,光斑颜色均匀,辐照度分布一致,无明显

的色差。将探测器目标区域离散划分为 1000 个采样点, 每个点的光强 (辐照度) 值为 $I_i (i=1,2,\dots, N)$, 则光强均匀性标准差计算公式如下:

$$\bar{I} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N I_i, \quad (6)$$

$$\sigma_I = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_i - \bar{I})^2}, \quad (7)$$

$$RSD = \frac{\sigma_I}{\bar{I}} \times 100\%, \quad (8)$$

式中 \bar{I} 为平均光强, σ_I 为光强标准差, RSD 为相对标准差, RSD 计算值越小光强越均匀。将探测器中数据导入计算, 求得 $RSD=7.6\%$, 小于 10% , 符合系统参数指标。

由下图 10、11 可知, 光电探测器在近紫外 400 nm 的信号幅值由 0.8 V 增大至 2.63 V; 红外 2400 nm 信号幅值由 7.5 V 增大至 9.5 V。

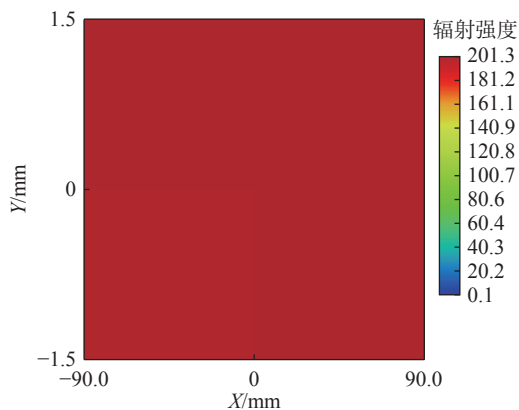


图 9 狭缝区域辐照分布

Fig. 9 Irradiance Distribution in the Slit Region

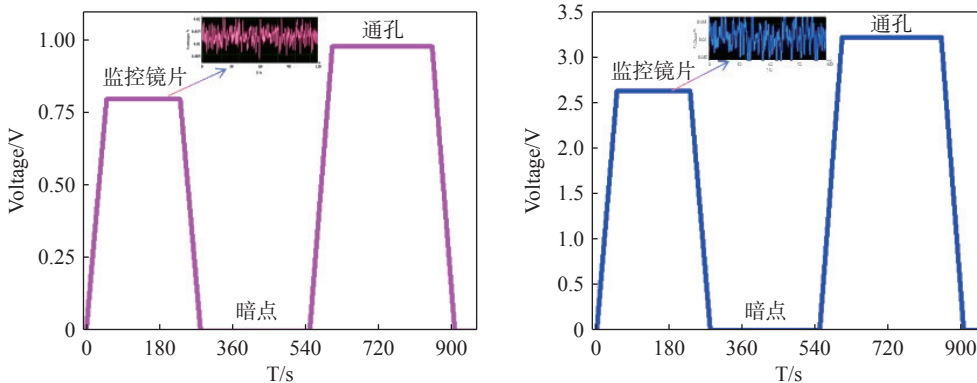


图 10 400nm 优化前后信号幅值

Fig. 10 Signal Amplitude at 400 nm: Pre- vs Post-Optimization

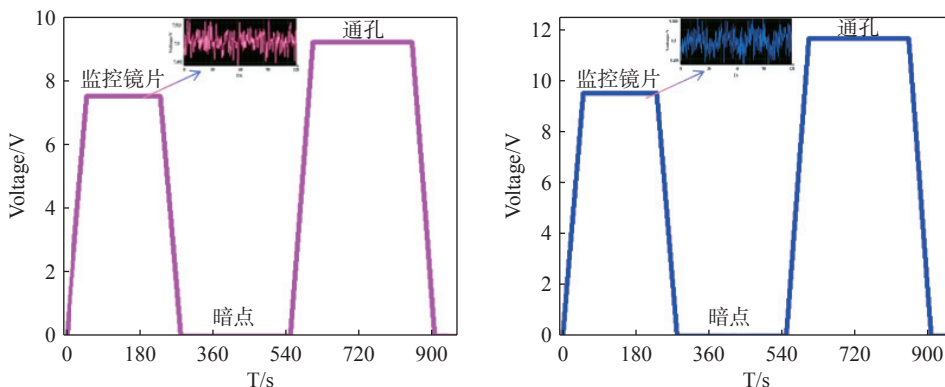


图 11 2400 nm 优化前后信号幅值

Fig. 11 Signal Amplitude at 2400 nm: Pre- vs Post-Optimization

经过实测分析, 系统噪声主要来源于探测器的本底噪声 (底噪) 和杂散光。实验中, 光源供电电压范围为 0-12 V, 当探测器进光狭缝宽度为

0.5 mm 时, 如图 12 所示为优化前后系统底噪、信号幅值及信噪比随电源电压的变化关系。

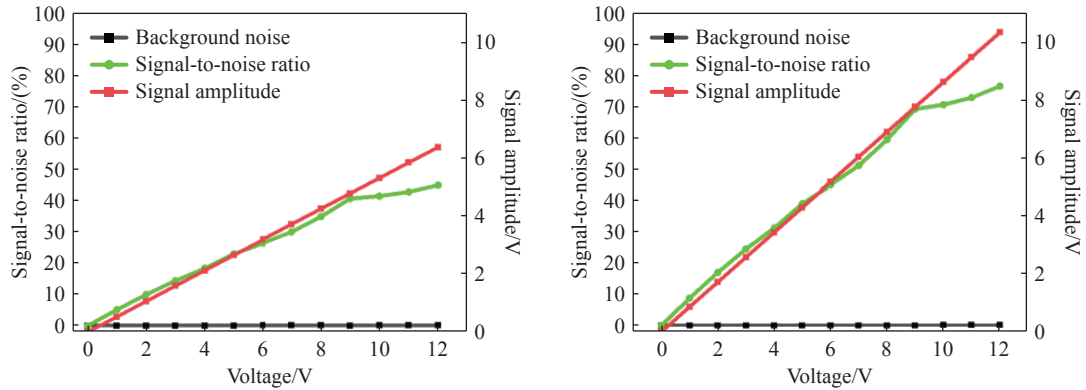


图 12 底噪、信噪比与信号幅值关系曲线

Fig. 12 Relationship Between Noise Floor, SNR, and Signal Amplitude

由图可知,优化前后系统的底噪保持稳定,未因电源电压变化而波动。为兼顾光源的长期稳定运行与系统性能,通常采用 10 V 电压供电。在此条件下,信号幅值由优化前的 5.3 V 提升至 8.3 V,信噪比相应提高了 70.38%,增强了系统的稳定性与可靠性。

4 装配误差分析

在装配过程中,透镜组间的径向误差以及光纤接收端与透镜的角度偏差是影响光路传输质量的关键因素。基于 Zemax 软件对装配误差引起的信号辐照强度变化进行了仿真分析,结果如表 6 所示。

由表 6 可知,在 ± 1 mm 的装配公差范围内,光源端与真空室内透镜组所引起的辐照强度变化均小于 3%,表明透镜组对径向误差具有较好的鲁棒性。为两组透镜分别设计了公差为 ± 0.5 mm 的镜筒结构(如图 13 所示),在保证系统性能的同时兼顾了装配可行性。

仿真结果显示光纤接收端对径向误差极为敏感,最大可导致 24.03% 的辐照强度降低。为有效控制该误差,设计研制了五个自由度光纤装调机构,如图 14 所示。该机构支持径向范围内的任意微调,并配备俯仰调节旋钮,用于精确校正光纤端面与透镜之间的角度偏差(每两圈螺丝对应 1.5°),从而提升装调精度与系统稳定性。为提升系统在不同工况下的适应性与可靠性,后续必须考虑镀膜环境下温度波动、机械振动等因素对系统辐照强度的影响。

表 6 装配误差分析

Tab. 6 Assembly Error Analysis

装配对象	公差	辐照强度变化/%
光源端 透镜组	Z轴偏差: +1 mm	2.57
	Z轴偏差: -1 mm	2.65
	Y轴偏差: +1 mm	2.71
	Y轴偏差: -1 mm	2.66
	X轴偏差: +1 mm	1.96
	X轴偏差: -1 mm	2.10
真空室内 透镜组	Z轴偏差: +1 mm	2.35
	Z轴偏差: -1 mm	2.46
	Y轴偏差: +1 mm	2.51
	Y轴偏差: -1 mm	2.49
	X轴偏差: +1 mm	2.55
	X轴偏差: -1 mm	2.52
光纤 接收端面	Z轴偏差: +1 mm	23.70
	Z轴偏差: -1 mm	24.03
	Y轴偏差: +1 mm	15.17
	Y轴偏差: -1 mm	15.36
	X轴偏差: +1 mm	17.66
	X轴偏差: -1 mm	17.62

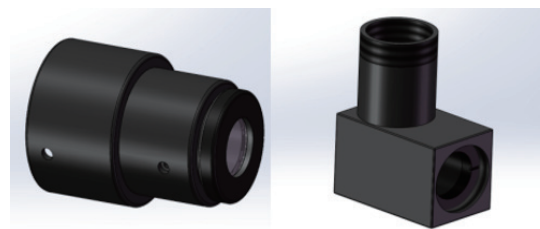


图 13 光源端镜筒(左)、真空室内镜筒(右)

Fig. 13 Lens tube at the light source end (left), lens tube in the vacuum chamber (right)

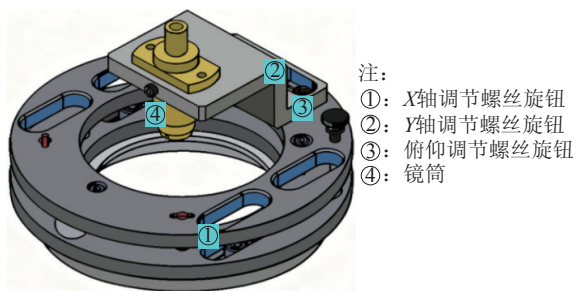


图 14 五自由度光纤装调机构

Fig. 14 Five-Degree-of-Freedom (5-DOF) Fiber Alignment Mechanism

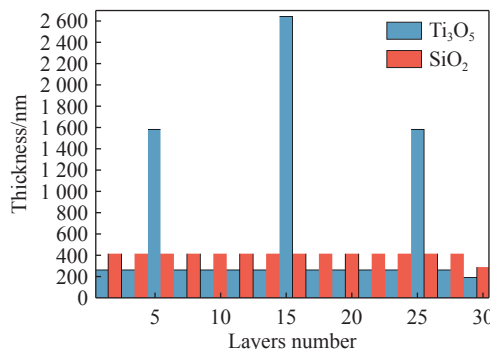


图 16 膜厚结构柱状图

Fig. 16 Bar chart of film thickness structure

5 实验

根据 Zemax 优化后的参数对光路系统硬件进行定制加工, 安装调试后进行镀膜试验测试其精度和稳定性, 在红外波段 2400 nm 处, 信号幅值达到 8.2 V。在红外波段选取 Ti_3O_5 作为高折射率材料, 低折射率材料选用 SiO_2 。使用 Macleod 软件设计膜系为 $Sub/(HL)^2 6H L (HL)^2 (HL)^2 10H L (HL)^2 (HL)^2 6H L H(HL)^2/Air$, 总厚度 15062.24 nm, 中心波长 2400 nm, 半高宽为 40 nm 的窄带滤光膜系, 并在相同实验条件下进行重复制备。下图 15、16 分别为膜系设计曲线和膜厚结构柱状图。

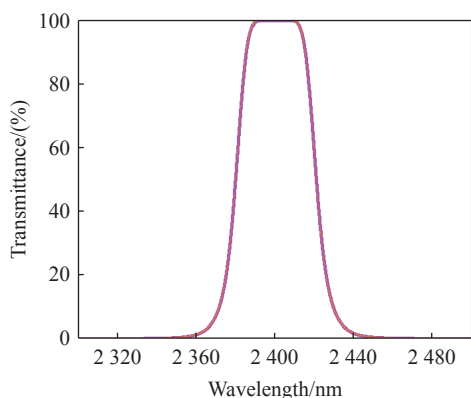


图 15 2400-40 nm 窄带设计曲线

Fig. 15 narrowband design curve of 2400-40 nm

具体实验条件为: 本底真空度 $8 \times 10^{-4} Pa$, 烘烤温度 $220^\circ C$, 蒸发速率 Ti_3O_5 为 $4 \text{ \AA}/S$, SiO_2 为 $6 \text{ \AA}/S$, 详细的工艺参数见表 7 所示。

通过透过率监控该膜系, 采用光控与晶控相结合的方式对膜层进行监控, 粘结层和最后两层使用晶控, 其余全部采用光控, 其监控曲线如图 17 所示。

表 7 工艺参数

Tab. 7 Process Parameters of Ion Source

材料	蒸发速率 / $\text{\AA}/S$	充氧量	离子源参数		
			电压/V	电流/mA	流速/SCCM
离子源清洗			750	750	8(Ar), 50(O ₂)
Ti_3O_5	0.4	30	1150	950	8(Ar), 50(O ₂)
SiO_2	0.6	0	1150	950	8(Ar), 50(O ₂)

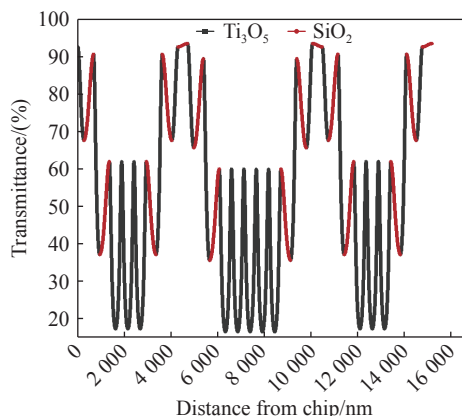


图 17 膜层监控曲线

Fig. 17 Film layer monitoring curve

镀膜实验样品使用 Lambda 1050 分光光度计对光谱进行测试, 测得其透过率光谱如图 18 所示。

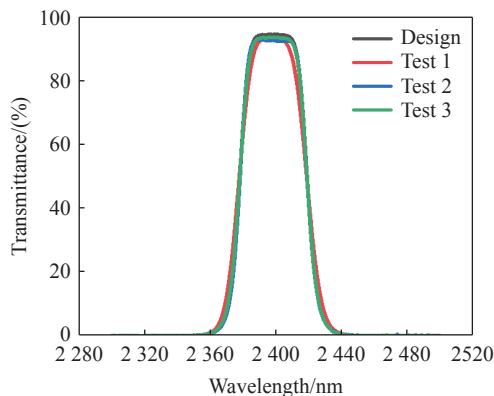


图 18 2400 nm 窄带滤光膜光谱

Fig. 18 Spectrum of 2400 nm narrowband filter film

由设计和测试曲线可知,制备的 2400 nm 窄带滤光膜中心波长与设计相差 0.8 nm,半高宽为 40 nm 与设计曲线一致。进行重复性实验,结果表明中心波长和半高宽偏差在 ± 0.2 nm 之间,造成偏差原因可能是由于镀膜周期长, Ti_3O_5 材料的折射率和吸收特性变化,不同监控镜片的初始透过率不同使整体镀膜监控曲线上下移动,导致极值法的误差补偿不一样等。

6 结 论

针对直控式光学膜厚监控系统因卤钨灯光源

发散与弱响应波段信噪比低导致的膜厚控制误差大的问题,设计并组装了一套外置光纤耦合与准直聚焦的光信号调制系统。通过将光信号收发端完全外置,有效隔离了真空腔体的环境干扰;基于 Zemax 的全光路系统性优化使光纤接收端辐照强度和信号幅值大幅提升,系统信噪比提高了 70.38%;最终经 2400 nm 波段的 40 nm 窄带滤光膜制备验证,重复制备中心波长偏移小于 1 nm,半高宽保持一致,证实该系统提升了弱响应波段的监控精度与稳定性,为窄带滤光膜的制备提供了一种有效的解决方案。

参考文献:

- [1] 唐晋发, 顾培夫, 刘旭. 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. *Modern Optical Thin Film Technology*[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. (in Chinese).
- [2] 庄秋慧, 王三强. 光学膜厚的监控方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(10): 103102.
ZHUANG Q H, WANG S Q. Monitoring method of optical film thickness[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(10): 103102. (in Chinese).
- [3] 常敏, 华博, 张学典, 等. 光电极值法结合外差干涉法监控膜厚的研究[J]. *光学技术*, 2017, 43(2): 184-186.
CHANG M, HUA B, ZHANG X D, *et al.*. Study on film monitoring based on the photoelectric extreme value method combined with heterodyne interferometry[J]. *Optical Technique*, 2017, 43(2): 184-186. (in Chinese).
- [4] BRUNS S, FARR P, MELZIG T, *et al.*. Improving optical thickness monitoring by including systematic and process-influenced transmittance deviations[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(7): B141-B147.
- [5] LI N, WANG G H, BAI X S, *et al.*. Effect of quartz crystal thermal stress on its performance in active temperature control quartz crystal microbalance dew point sensors[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, 369: 132283.
- [6] DONG S T, FU X H, LI CH. Noble infrared optical thickness monitoring system based on the algorithm of phase-locked output current-reflectivity coefficient[J]. *Coatings*, 2022, 12(6): 782.
- [7] MELZIG T, AMOCHKINA T, BRUNS S, *et al.*. Influence of fitting algorithms on thickness determination during monitoring of optical coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2024, 476: 130197.
- [8] 杜昕, 付秀华, 董所涛, 等. 变量耦合动态监控光学膜厚补偿技术[J]. *中国光学 (中英文)*, 2025, 18(3): 467-476.
DU X, FU X H, DONG S T, *et al.*. Variable coupling dynamic monitoring and compensation technology of optical film thickness[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(3): 467-476. (in Chinese).
- [9] MELZIG T, AMOCHKINA T, BRUNS S, *et al.*. Influence of fitting algorithms on thickness determination during monitoring of optical coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2024, 476: 130197. (查阅网上资料, 本条文献与第 7 条文献重复, 请确认).
- [10] 谢海峰, 付秀华, 董所涛, 等. 膜厚监控系统准直聚焦耦合光路的研制[J]. *光学精密工程*, 2025, 33(1): 25-36.
XIE H F, FU X H, DONG S T, *et al.*. Development of collimated focus coupled optical path for film thickness monitoring system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(1): 25-36. (in Chinese).
- [11] BRUNS S, FARR P, MELZIG T, *et al.*. Improving optical thickness monitoring by including systematic and process-influenced transmittance deviations[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(7): B141-B147. (查阅网上资料, 本条文献与第 4 条文献重复, 请确认).
- [12] TIKHONRAVOV A, KOCHIKOV I, SHARAPOVA S, *et al.*. Optical monitoring of coating production: correlation of errors and errors self-compensation[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11872: 118720Q.
- [13] 杨琪, 曾敏, 周文祺, 等. 基于直流磁控溅射 VO_2 薄膜的高效近红外光电探测器[J]. *发光学报*, 2025, 46(11): 2119-2128.

- YANG Q, ZENG M, ZHOU W Q, *et al.*. DC magnetron-sputtered VO₂ thin films: towards high-performance near-infrared photodetectors[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2025, 46(11): 2119-2128. (in Chinese).
- [14] 张丹丹, 黄芷婷, 李君, 等. 半导体激光器与光纤耦合效率仿真分析[J/OL]. *应用光学*, 2025: 1-15 (2025-09-01)[2025-11-24]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1171.O4.20250901.1415.002>.
- ZHANG D D, HUANG ZH T, LI J, *et al.*. Optimization of coupling efficiency between semiconductor laser and fiber based on intelligent algorithm[J/OL]. *Journal of Applied Optics*, 2025: 1-15 (2025-09-01)[2025-11-24]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1171.O4.20250901.1415.002>. (in Chinese).
- [15] 王锦荣, 叶建春, 侯丽英, 等. 基于 Zemax 非球面单透镜的优化设计[J]. *空间电子技术*, 2024, 21(5): 87-92.
- WANG J R, YE J CH, HOU L Y, *et al.*. The optimum design of aspherical single lens based on Zemax[J]. *Space Electronic Technology*, 2024, 21(5): 87-92. (in Chinese).
- [16] 周双, 刘子建. 光学系统装配误差分析及装调路径优选[J]. *机械设计与制造*, 2022, 371(1): 159-163,167.
- ZHOU SH, LIU Z J. The assembly error analysis of optical system and path optimization of alignment[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2022, 371(1): 159-163,167. (in Chinese).

作者简介:



谷培兵(2000—), 男, 河北邢台人, 硕士研究生, 2023 年于长春理工大学获得学士学位, 主要从事光学薄膜方面的研究。E-mail: 1987390766@qq.com



付秀华(1963—), 女, 吉林长春人, 博士, 教授, 博士生导师, 2010 年于长春理工大学获得博士学位, 主要从事光学薄膜和光学制造方面的研究。E-mail: goptics@126.com