

5G 通信 LWDM 窄带滤光膜的研制

张静¹, 刘海成^{1*}, 付秀华^{1,2}, 王升耆³, 王一博¹, 刘俊岐¹, 张天翔¹, 杨飞⁴, 李刚⁵¹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光驰科技(上海)有限公司, 上海 200444;⁴中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;⁵云南北方光学科技有限公司, 云南 昆明 650216

摘要 为了满足 5G 光通信对细波分复用(LWDM)窄带滤光膜的要求,笔者采用电子束与离子辅助沉积技术,在 K9 基底上镀制了高质量光通信滤光膜。提出了一种高精度调试膜厚均匀性与光谱一致性的方法,该方法通过对特殊膜系镀膜结果进行反演分析,能快速分析出 Ta_2O_5 和 SiO_2 两种材料光学厚度的误差,根据分析结果调节修正板,可以有效解决光学厚度匹配的问题,改善窄带滤光膜光谱。在镀制过程中采用光学直接监控法监控膜厚,对基板的实时光量值曲线进行拟合,根据拟合结果监控膜层厚度,同时采用晶控平均厚度法对耦合层与非规整膜层进行监控,提高了监控精度。最终制备的滤光膜在 -0.2 dB 处的带宽为 4.1 nm,通带内最大插入损耗为 0.14 dB,通带波纹为 0.04 dB, -27 dB 处带宽为 6.0 nm,满足细波分复用窄带滤光膜的技术要求。

关键词 光通信; 细波分复用; 光学直接监控法; 晶控平均厚度法; 通带波纹

中图分类号 O484

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221491

1 引言

波分复用(WDM)技术可以使不同波长的光信号在同一根光纤中传输而互不干扰,从而使得光通信的信息容量成倍增加,已成为 5G 主流技术方案。在众多的波分复用方案中,细波分复用(Lan-WDM,即 LWDM)以其工作波长位于零色散附近、色散小、稳定性好、可靠性高等优势被广泛研究与应用^[1]。窄带滤光膜是光通信关键元件——复用与解复用器的重要组成部分。光通信的发展对 LWDM 窄带滤光膜提出了越来越高的要求,设计并制备出带宽窄、通带波纹小、插入损耗低、截止带透射隔离度大并且满足现代光通信技术要求的窄带滤光膜,是一项具有一定挑战性的工作。

2013 年,俞侃等^[2]提出了基于遗传算法的斜入射窄带滤光片的膜系设计优化方法,并采用该方法设计、制备了可用于 18° 倾斜入射的、 0.8 nm 信道间隔的五腔窄带滤光片。2018 年,庄秋慧等^[3]提出了一种提高光电极值法中膜层厚度监控精度的方法,该方法通过算法处理将监控信号与光学厚度之间的非线性关系转变成线性关系,并推算出最佳起判时间,避免了监控薄膜

沉积时非线性误差对极值点判别的影响。2019 年, Shtyrkova 等^[4]针对多空间模式光子计数探测器抑制光学背景噪声这一需求,设计了在 1550 nm 处插入损耗小于 0.7 dB 的窄带滤波片,并对频谱带宽、空间带宽、滤波器插入损耗、温度引起的性能变化进行了研究。2019 年,张金豹等^[5]基于规整全介质窄带滤光膜系的初始结构以及薄膜厚度误差修正因子阶跃式微小跃变的思想,对变形光谱曲线进行了拟合反演。2021 年,张小飞^[6]使用离子束溅射镀膜设备制备了可在 13.5° 大角度下使用的带通滤光膜,分析并解决了耦合层膜厚监控的问题。2022 年,陈星聿等^[7]针对通信网络分光器的使用要求,采用光控-晶控综合监控方法,制备了截止深度为 OD3、最大插入损耗小于 1.2 dB 的窄带滤光膜。

目前,国内外对窄带滤光膜的研究较为成熟,但对于热蒸发制备 LWDM 滤光膜的报道还比较少。针对 LWDM 窄带滤光膜膜层较多、监控误差大、光谱易变形等问题,笔者在镀制过程中采用光学直接监控法监控膜厚,对基板的实时光量值曲线进行拟合,根据拟合结果控制膜层厚度,同时采用晶控平均厚度法监控耦合层与非规整膜层,提高了监控精度。笔者提出了一

收稿日期: 2022-12-05; **修回日期:** 2022-12-31; **录用日期:** 2023-02-08; **网络首发日期:** 2023-03-13

基金项目: 吉林省科技发展计划国际科技合作项目(20210402065GH)、中国科学院青年创新促进会优秀会员资助项目(Y202053)、中国科学院国际伙伴计划(181722KYSB20200001)、国家自然科学基金(11973040)

通信作者: *liuhaicheng2022@163.com

种高精度调试膜厚均匀性与光谱一致性的方法,该方法能快速分析出 Ta_2O_5 和 SiO_2 这两种材料光学厚度的比例,解决光学厚度匹配的问题。

2 膜系设计

LWDM 滤光膜的技术要求如 1 表所示。

表 1 光通信滤光膜的技术要求

Table 1 Technical requirements for optical communication filter films

Parameter	Indicator
Central wave length /nm	1304.58
Angle of incidence /($^\circ$)	5.4
Passband /nm	2.2
Ripple within passband /dB	≤ 0.2
Maximum insertion loss within passband /dB	≤ 0.2
Reflection band /nm	$1260 - (\lambda_c - 3.2) \& (\lambda_c + 3.2) - 1360$
Reflection isolation within passband /dB	> 27
Thickness /mm	< 0.8

由表 1 可知,LWDM 窄带滤光膜的技术要求较为严苛,普通膜系难以满足要求。目前的主流设计方法是以 F-P 膜系结构为基础进行膜系设计^[8]。全介质 F-P 膜系结构由两侧的反射膜堆与中间的间隔膜堆组成,根据等效层理论^[9],可以将 F-P 结构等效为两侧反射层与中间间隔层的组合,如图 1 所示。

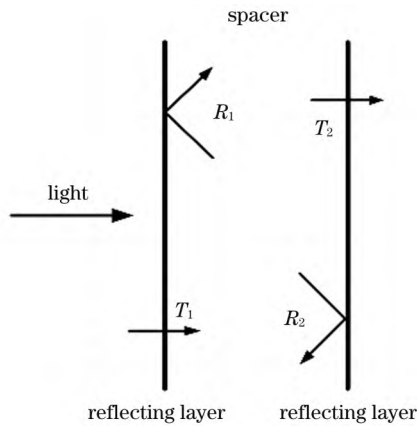


图 1 F-P 膜系结构图

Fig. 1 F-P film structure diagram

F-P 膜系的透过率方程^[10]为

$$T = \frac{T_0}{1 + F \sin^2 \theta}, \quad (1)$$

其中,

$$T_0 = \frac{T_1 \cdot T_2}{(1 - \sqrt{R_1 \cdot R_2})^2}, \quad (2)$$

$$F = \frac{4 \sqrt{R_1 \cdot R_2}}{(1 - \sqrt{R_1 \cdot R_2})^2}, \quad (3)$$

$$\theta = \frac{1}{2}(\varphi_1 + \varphi_2 - 2\delta), \quad (4)$$

式中: R_1 、 R_2 为两侧反射层的反率; φ_1 和 φ_2 为两侧反射层的反射相位; δ 为中间间隔层的相位厚度。

选用 Ta_2O_5 和 SiO_2 作为高低折射率材料,两种材料的光学常数如图 2 所示。由于采用高折射率材料作为间隔层可以减小全介质 F-P 滤光膜中心波长的偏移^[11],因此选择高折射率材料作为间隔层。当间隔层为高折射率材料且反射膜系对称、反射率足够高时,F-P 膜系的通带半宽度^[9]为

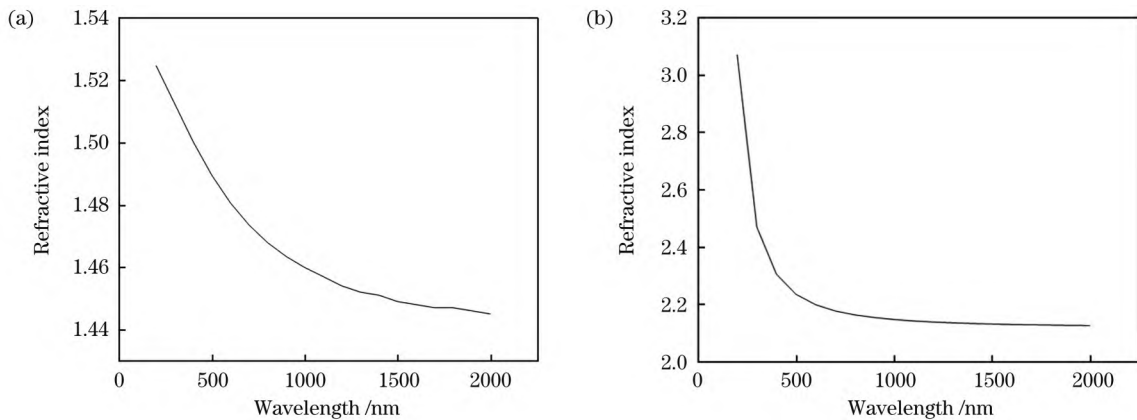


图 2 两种材料的光学常数曲线。(a) SiO_2 ; (b) Ta_2O_5

Fig.2 Optical constant curves of two materials. (a) SiO_2 ; (b) Ta_2O_5

$$2\Delta\lambda = \frac{2\lambda_0}{m\pi} \arcsin\left(\frac{T_{12}}{2}\right), \quad (5)$$

其中,

$$T_{12} = 4Y_{12}/n_H, \quad (6)$$

$$Y_{12} = \frac{n_L^{2x}}{n_H^{2x}} n_g, \quad (7)$$

式中: T_{12} 为反射膜的透射率; Y_{12} 为反射膜的等效导纳; n_H 为 Ta_2O_5 材料的折射率, $n_H=2.13$; n_L 为 SiO_2 的折射率, $n_L=1.46$; n_g 为基板的折射率, $n_g=1.52$; x 为多层反射膜中高折射率层的总层数。随着干涉级次以及反射膜堆高折射率层层数增加, 通带半宽度逐渐减小。

选择合适的干涉级次 ($m=3$) 与反射层层数 ($x=5$), 根据式 (7) 计算得单腔膜系通带半宽度约为 6 nm。由于要求通带半宽度小于 5.6 nm, 因而需要进一步优化膜系, 减小带宽。Baumeister 曾指出: 将与间隔层相邻的一层薄膜的厚度从 1H (或 1L) 增加到 3H (或 3L), 通带变窄的效果相当于间隔层的级次从 1 增加到 3; 将与间隔层相邻的两层薄膜的厚度从 HL (或 LH) 增加到 3H3L (或 3L3H), 通带变窄的效果相当于间隔层级次从 1 增加到 5^[12]。此外, 为了便于测量, 将入射角度改为 0° , 并添加匹配层 (以减小通带波纹^[13]), 则实际的膜系为 $G|(\text{HL})^46\text{H}(\text{LH})^4\text{L}(\text{HL})^56\text{H}(\text{LH})^5\text{LHL3HL3H3L3HLHL6HLHLHL3HL3H3LHLHL3HL3H3L3HLHL6HLHLHL3HL3H3LHL}(\text{HL})^56\text{H}(\text{LH})^5\text{L}(\text{HL})^46\text{H}(\text{LH})^4\text{L}0.34\text{H}1.29\text{L}|A$, 其中 A 代表空气, G 代表 K9 玻璃。光谱曲线如图 3 所示, 中心波长为 1308.2 nm, -0.2 dB 处通带宽度为 4.0 nm, 通带最大插入损耗小于 0.02 dB, 通带波纹小于 0.01 dB, -27 dB 处带宽为 6.01 nm, 符合 LWDM 滤光膜的技术要求。基板选择易加工且理化性质稳定的 K9 玻璃, 基板尺寸为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 。膜厚监控系统的光谱宽度会对窄带滤光片的监控误差产生重要影响^[14], 因此膜厚监控系统使用激光光源, 波长精度可达 $\pm 20\text{ pm}$ 。为了抑制激光在非镀膜面上的反射光与入射激光发生干涉, 影响监控精度, 将基板非镀膜面进行磨砂处理, 利用 Zygo

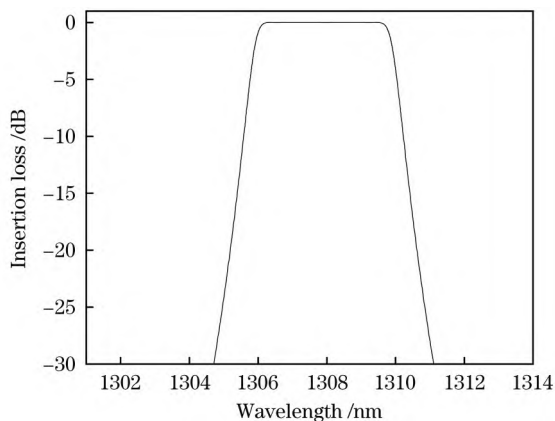


图 3 膜系设计曲线

Fig. 3 Design curve of the film system

干涉仪对其表面粗糙度进行测量, 抛光面的均方根粗糙度为 4.5 nm, 磨砂面的均方根粗糙度为 307 nm。

3 薄膜制备及实验分析

实验设备为光驰科技 (上海) 有限公司生产的 SPOC-1300TCI 真空镀膜机, 该镀膜机配备有双 180° 电子枪、 $\varnothing 600\text{ mm}$ 双环坩埚、射频离子源、六点位晶控探头。本文采用直接光控法监控膜层厚度, 监控设备配备有 TSL-550 可调谐激光光源及配套的直接光控系统, 如图 4 所示。激光光源发出的激光一部分传送给锁相放大器 (MFLI), 一部分经光纤传输, 由真空室下方入射, 经过基板被真空室上方的 DP 功率计接收。光信号经锁相放大器滤波后传输给远程计算机 (DHOM-D) 进行数据处理。

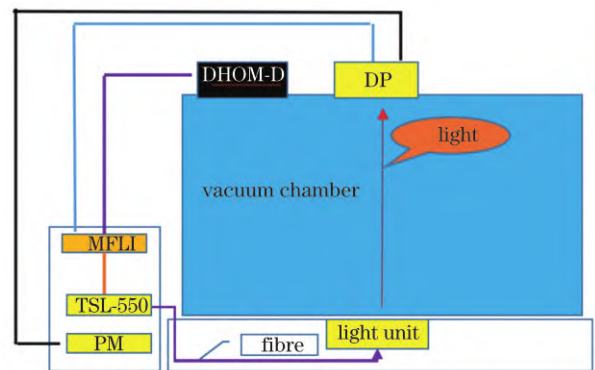


图 4 光学膜厚监控系统结构图

Fig. 4 Structure diagram of optical film thickness monitoring system

普通的直接光控监控系统判断峰值的依据是光亮曲线的斜率, 当斜率由 + 变到 - 或由 - 变到 + 时则判断出现峰值。该方法存在判断延迟的问题, 而且对环境噪声的要求较高 ($-0.1\% \sim +0.1\%$ 以内)^[15]。笔者采用新的光学直接监控方法进行膜厚监控, 即: 先对基板实时光亮值信号进行采集, 远程计算机对采集的光亮数据进行拟合, 然后计算拟合函数导数值为 0 时所对应的时间, 将其作为当前层的停镀点, 到达拟合时间后结束蒸镀, 如图 5 所示。拟合公式为多项式, 其表达式为

$$y = A_1t + A_2t^2 + A_3t^3 + A_4t^4 + \dots + A_it^i + B, \quad (8)$$

式中: y 为拟合曲线的光亮值; A_i 为多项式的系数, 由远程计算机根据采集的数据拟合得到; t 为当前层镀膜时间; B 为当前层基板的起始光亮值。此方法能够精确监控膜厚, 同时对环境噪声的要求相对较低 ($\pm 0.2\%$)。

对于连接两个单腔 F-P 膜系的耦合层和匹配导纳的非规整膜层, 由于其光亮值变化较小, 采用光学极值法监控引入的误差会比较大, 所以采用晶控平均厚度法, 即: 将与监控层材料相同的前 3 层膜的物理厚度加权平均, 计算单位光学厚度对应的物理膜厚。计算公式为

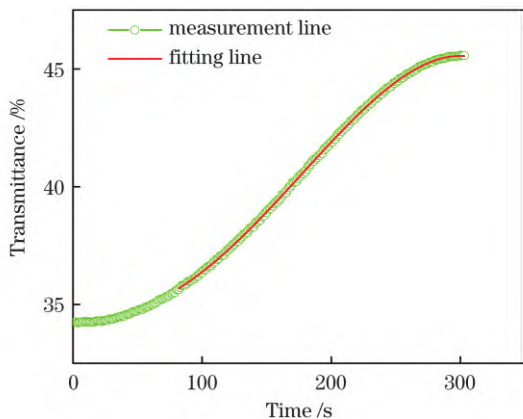


图 5 SiO₂膜层监控曲线

Fig. 5 SiO₂ film monitoring curve

$$T_U = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{X_i}{P_i}, \quad (9)$$

式中: X_i 为记录的第*i*层晶控的物理厚度; P_i 为第*i*层 Peak 数。将计算出的单位厚度与耦合层设置的 Peak 数相乘,作为当前层的监控厚度,可提高耦合层的监控精度。

3.1 膜层表面形貌

薄膜的表面形貌直接关系到薄膜的力学、电学和光学等性质^[16],因此对影响膜层表面形貌的因素进行了研究。采用厚度为 1 mm 的双面抛光的 K9 玻璃作为基板,膜层和基板的粗糙度用 Zygo 干涉仪进行测量。为了保证测量结果的可靠性,每一个样片设置 4 个

测量点,取测量的平均值作为该次测量的结果。由于加工存在误差,空白基板的表面粗糙度不尽相同,因此实验中分别测量了空白基板和镀膜后膜层的表面粗糙度,将两者相减的结果作为镀膜前后粗糙度的变化量。实验中的基本参数为:本底真空度 8.0×10^{-4} Pa,工件盘烘烤温度 200 °C,侧壁烘烤温度 150 °C,离子源的工作气体为氧气(流量为 50 mL/min),中和器的工作气体为氩气(流量为 8 mL/min),Ta₂O₅充 30 mL/min 的氧气,SiO₂不充氧气。

3.1.1 不同沉积速率对膜层表面形貌的影响

采用 INFICON 公司的 XTC-3 薄膜镀层控制仪调控电子枪电流,实现沉积速率的改变。在其他参数不变的情况下,Ta₂O₅和 SiO₂分别进行 5 次速率改变实验,结果如图 6 所示。可见:Ta₂O₅膜层的表面粗糙度均小于基板的表面粗糙度,SiO₂膜层的表面粗糙度均大于基板的表面粗糙度,两种材料膜层的表面粗糙度均随着蒸镀速率的提高而逐渐减小,并趋于平缓。这是因为沉积速率越大,说明电子枪的束流越大,材料蒸发时获得的初始能量越大,越有利于膜料分子吸附于基板表面后在基板表面向不同的方向扩散,表现为表面粗糙度逐渐减小的趋势;当沉积速率达到一定程度后,膜层表面粗糙度的变化逐渐趋于平缓。综合考虑沉积速率对膜层表面粗糙度的影响以及膜层厚度监控难易程度后,选择 Ta₂O₅和 SiO₂的沉积速率分别为 0.4 nm/s 和 0.8 nm/s。

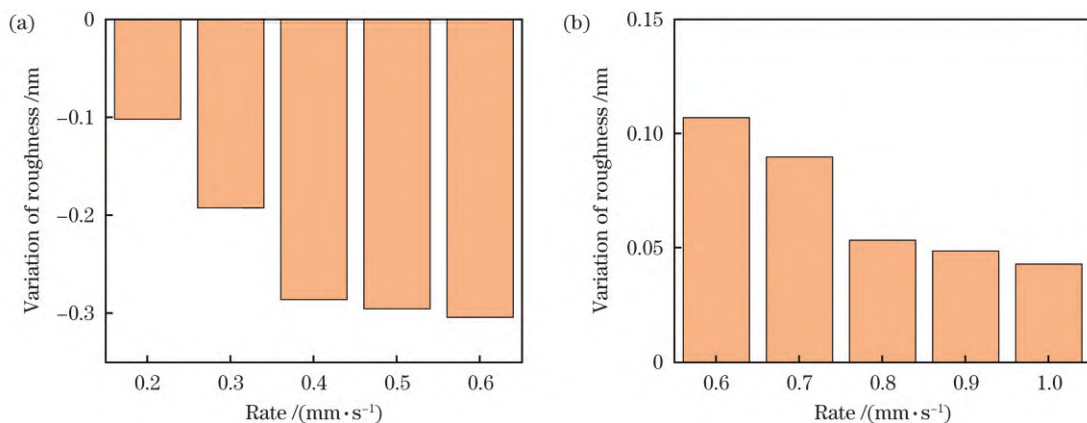


图 6 不同速率下镀膜表面粗糙度的变化情况。(a) Ta₂O₅; (b) SiO₂

Fig. 6 Surface roughness changes before and after coating at different rates. (a) Ta₂O₅; (b) SiO₂

3.1.2 不同离子源能量对膜层表面形貌的影响

通过调节射频离子源的电压实现离子源能量的改变。在不同的离子源能量下,膜层相对于基板表面粗糙度的变化情况如图 7 所示。可见:Ta₂O₅膜层的表面粗糙度均小于基板的表面粗糙度,SiO₂膜层的表面粗糙度均大于基板的表面粗糙度,但膜层表面粗糙度的变化不大。

3.2 窄带滤光膜实验及分析

选择合适的工艺参数镀制窄带滤光膜,离子源参数如表 2、3 所示(E/B 表示离子源电流与中和器电流

之比),结果如图 8 所示。光谱曲线中心波长为 1307.5 nm,通带最大插入损耗为 -0.56 dB,通带波纹为 0.37 dB,与理论膜系存在一定差距。

窄带滤光膜的膜层较多,镀膜时间长,导致真空室真空度、材料蒸发特性、修正板等机械结构在长时间高温环境下发生变化,膜层的实际厚度与设计不符^[17]。Ta₂O₅和 SiO₂两种材料的光学厚度比例失衡,使得光谱发生变形。借助 Macleod 软件对光谱曲线进行反演分析,发现难以判断两种材料的厚度误差。针对这一问题,笔者设计了一种特殊的膜系,膜系为 Sub|(HL)

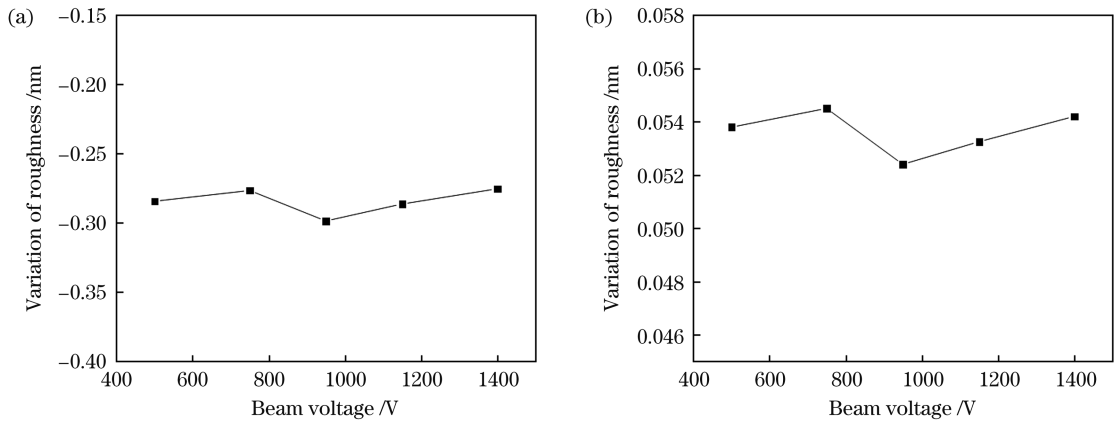


图 7 不同离子源能量下膜层表面粗糙度的变化情况。(a) Ta₂O₅; (b) SiO₂

Fig. 7 Variations of film surface roughness under different ion source energies. (a) Ta₂O₅; (b) SiO₂

表 2 离子源参数

Table 2 Ion source parameters

Material	Beam voltage / V	Beam current / mA	Accelerating voltage / V	Angle / (°)	E/B	O ₂ flow in gas tube 1/ (mL·min ⁻¹)	Ar flow in gas tube 2/ (mL·min ⁻¹)	Ar folw in gas tube 3/ (mL·min ⁻¹)
Ta ₂ O ₅	1150	950	600	14	1.5	50	0	8
SiO ₂	1150	950	600	14	1.5	50	0	8

表 3 两种材料的工艺参数

Table 3 Process parameters of two materials

Material	Rate / (nm·s ⁻¹)	Temperature / °C			Hearth speed / (r·min ⁻¹)	Flow / (mL·min ⁻¹)	Dome speed / (r·min ⁻¹)
		Dome	Monitor	Wall			
Ta ₂ O ₅	0.4	200	200	150	1/1000	30	180
SiO ₂	0.8	200	200	150	1/500	0	180

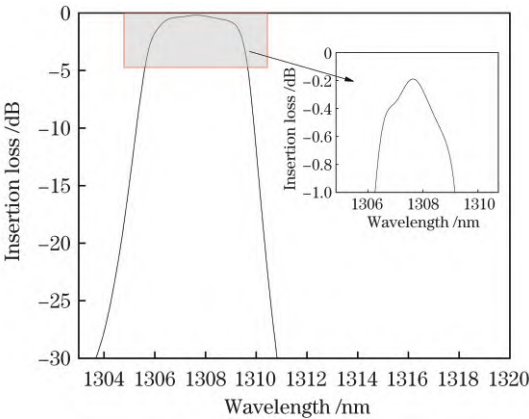


图 8 滤光膜的测试光谱曲线

Fig. 8 Test spectral curve of the filter film

⁵4L(LH)⁵2L(HL)⁵4L(LH)⁵L|Air, 其中 H 代表 Ta₂O₅, L 代表 SiO₂, Sub 为基板 K9, Air 代表空气, 其光谱曲线如图 9 所示。

根据膜系等效层理论, 可以将两个腔的 F-P 膜系等效成单腔 F-P 膜系, 即将第一个腔层与第二个腔层等效成单腔 F-P 膜系两侧的反射层, 原耦合层等效为单腔 F-P 膜系两侧的间隔层。将 44L 双腔膜系的耦合层由 L 改为 2L, 相当于提高了间隔层的厚度, 使得膜系干涉级

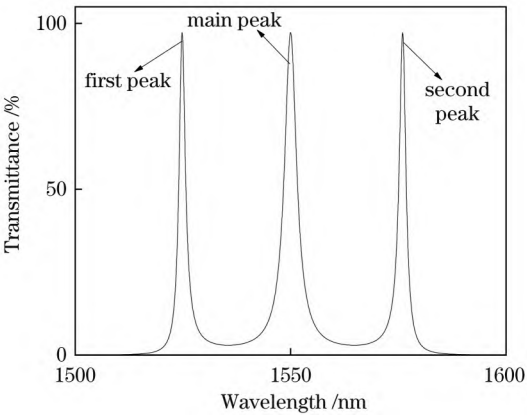


图 9 44 层双腔膜系的光谱曲线

Fig. 9 Spectral curve of 44-layer dual-chamber membrane system

次提高, 此时在中心波长处会出现一些透射峰。相邻透射峰之间的波长间隔并不相等, 而是随着材料种类与膜层厚度的变化而发生变化。Ta₂O₅ 和 SiO₂ 膜层相对厚度 (修正后厚度与原始厚度的比值) 的变化对光谱曲线的影响如图 10、11 所示。对该膜系镀制结果进行反演分析可以较为准确地判断 Ta₂O₅ 和 SiO₂ 材料的光学厚度误差, 根据分析结果调节修正板, 在修正均匀性

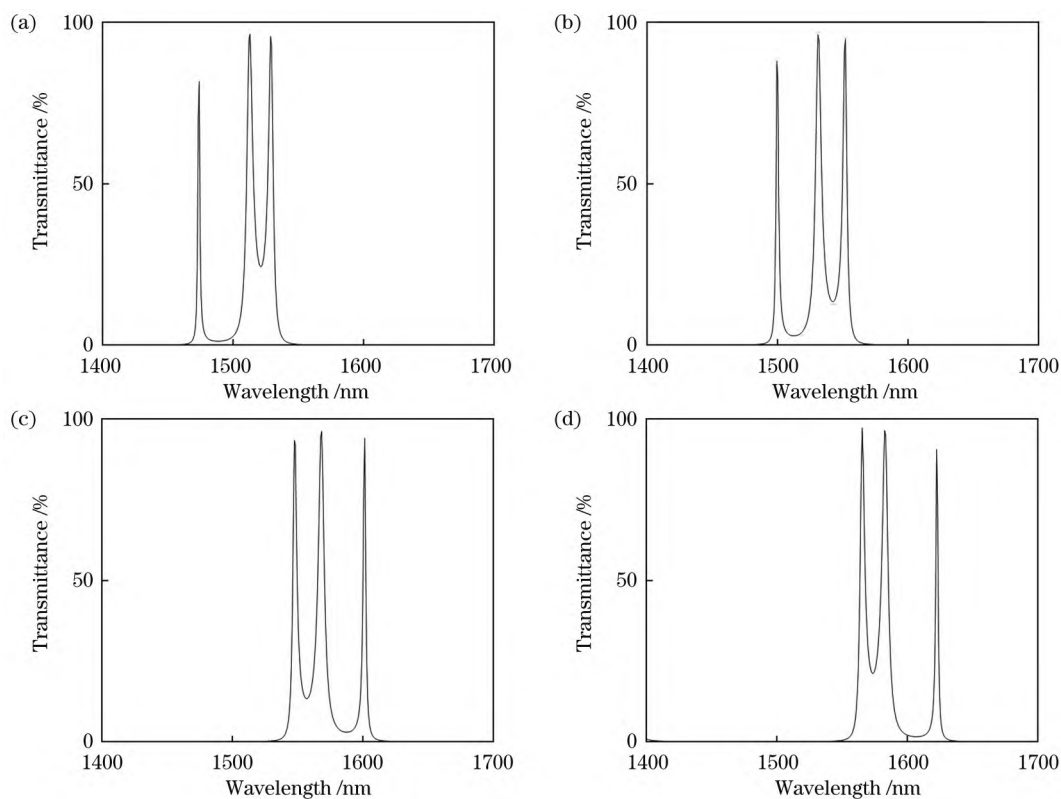


图 10 Ta_2O_5 厚度变化对膜系光谱曲线的影响。(a) Ta_2O_5 的相对厚度为 0.9; (b) Ta_2O_5 的相对厚度为 0.95; (c) Ta_2O_5 的相对厚度为 1.05; (d) Ta_2O_5 的相对厚度为 1.1

Fig.10 Influence of thickness change of Ta_2O_5 on spectral curve of the film system. (a) Relative thickness of Ta_2O_5 is 0.9; (b) relative thickness of Ta_2O_5 is 0.95; (c) relative thickness of Ta_2O_5 is 1.05; (d) relative thickness of Ta_2O_5 is 1.1

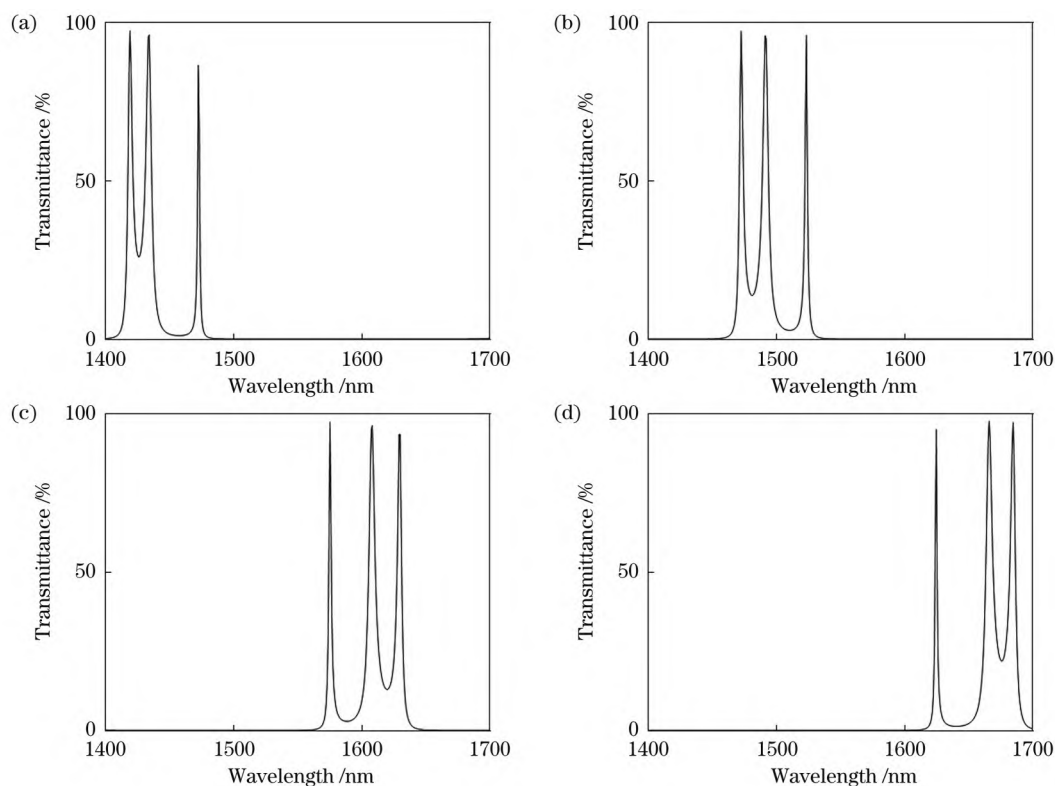


图 11 SiO_2 厚度变化对膜系光谱曲线的影响。(a) SiO_2 的相对厚度为 0.9; (b) SiO_2 的相对厚度为 0.95; (c) SiO_2 的相对厚度为 1.05; (d) SiO_2 的相对厚度为 1.1

Fig.11 Influence of SiO_2 thickness change on spectral curve of the film system. (a) Relative thickness of SiO_2 is 0.9; (b) relative thickness of SiO_2 is 0.95; (c) relative thickness of SiO_2 is 1.05; (d) relative thickness of SiO_2 is 1.1

的同时可以有效调节两种材料的比例,从而可以制备出窄带滤光膜。调试流程如图 12 所示。

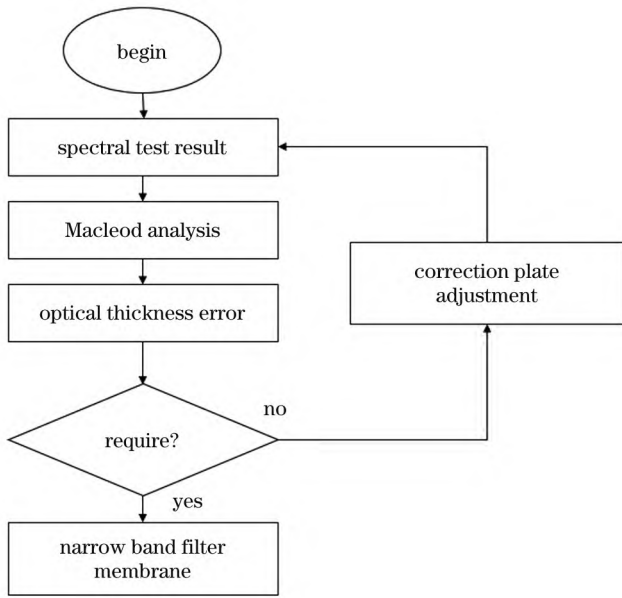


图 12 调试流程图

Fig. 12 Debugging flow chart

此外,笔者借助 Macleod 软件分析了膜系中各膜层的敏感度。膜系误差灵敏度分析就是考察膜系光谱特性随各层膜厚度变化的情况^[18]。如图 13 所示,耦合层前一层与间隔层后一层膜层的敏感度较高,采用逐腔镀膜的方法,每镀完一个腔测量一次,进行反演分析,结果发现可以通过改变耦合层的厚度来改善由敏感层膜厚误差导致的光谱变形,进而调节光谱曲线。优化后的膜系为 $G(HL)^46H(LH)^41.02L(HL)^56H(LH)^50.99LHL3HL3H3L3HLHL6HLHLHL3HL3H3LHLHL3HL3H3L3HLHL6HLHLHL3HL3H3LHL(HL)^56H(LH)^5L(HL)^46H(LH)^4L0.34H1.29L/A$ 。修正后膜系的光谱曲线如图 14 所示,中心波长为 1308.2 nm, -0.2 dB 处带宽为 4.1 nm,通带内最大插入损耗为 0.14 dB,通带波纹为 0.04 dB, -27 dB 处带宽为 6.0 nm,符合 LWDM 滤光膜的技术要求。

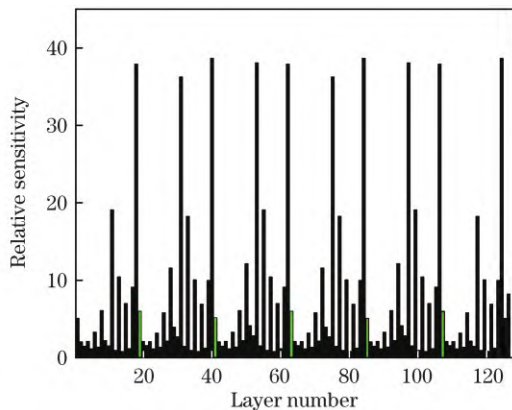


图 13 膜系中各膜层的相对敏感度

Fig. 13 Relative sensitivity of each film layer in the film system

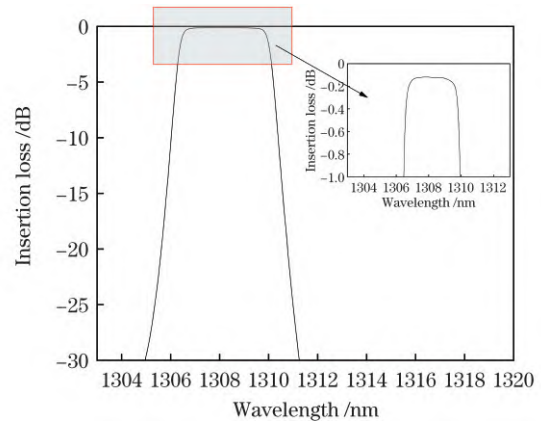


图 14 改进后的光谱曲线

Fig. 14 Spectral curve after improvement

4 结 论

本文对影响 F-P 膜系通带半宽度的因素进行了理论计算与分析,借助 Macleod 膜系软件设计出了满足光通信 LWDM 要求的窄带滤光膜。研究了沉积速率和离子源能量对 Ta_2O_5 和 SiO_2 两种材料膜层粗糙度的影响。 Ta_2O_5 膜层的表面粗糙度均小于基板的表面粗糙度, SiO_2 膜层的表面粗糙度均大于基板的表面粗糙度,两种材料膜层表面粗糙度均随着蒸镀速率的提高而逐渐减小,并趋于平缓。离子源能量对膜层表面形貌的影响较小。采用曲线拟合的直接光控监控方法监控规整膜层厚度,采用晶控平均厚度法监控耦合层与非规整膜层的厚度。提出了一种高精度调试膜厚均匀性与光谱一致性的方法。借助一种具有特殊光谱的膜系与修正板,可以有效调节窄带滤光膜的光谱曲线。改进工艺参数、优化膜系结构、降低滤光膜插入损耗是今后研究工作的重点。

参 考 文 献

- [1] 唐建军,李俊杰,闫飞.面向 5G 前传的 LWDM 技术方案和产业进展[J].通信世界,2020(16):33-35.
Tang J J, Li J J, Yan F. Technical scheme and industrial progress of LWDM for 5G preamble[J]. Communications World, 2020(16): 33-35.
- [2] 俞侃,廖剑锋,张晓丹,等.基于遗传算法的斜入射窄带滤光片膜系优化设计[J].光子学报,2013,42(2):181-185.
Yu K, Liao J F, Zhang X D, et al. Optimal design of narrowband filter in oblique incidence based on genetic arithmetic[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(2): 181-185.
- [3] 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.
- [4] Shtyrkova K, Gaschits I, Caplan D O. Narrowband optical filtering for background-limited photon-counting free-space optical communications[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10910: 109100F.
- [5] 张金豹,王明慧,耿浩,等.时间监控法制备窄带滤光膜系工艺技术[J].陕西理工大学学报(自然科学版),2019,35(2):12-16.
Zhang J B, Wang M H, Geng H, et al. Technology of narrow bandpass interference filter by time monitoring method[J]. Journal

- of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 35(2): 12-16.
- [6] 张小飞. 光纤通信中带通滤光膜的研制[J]. 长江信息通信, 2021, 34(1): 217-218, 222.
- Zhang X F. Development of filter film in optical fiber communication[J]. Changjiang Information & Communications, 2021, 34(1): 217-218, 222.
- [7] 陈星聿, 付秀华, 朱忠尧, 等. 用于 5G 分光器件低损耗滤光膜的研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2022, 45(5): 26-31.
- Chen X Y, Fu X H, Zhu Z Y, et al. Research on low-loss filter film for 5G optical splitters[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 45(5): 26-31.
- [8] 李芳, 林永昌. 应用于光纤通信 DWDM 系统的超窄带滤光片的设计[J]. 北京理工大学学报, 2001, 21(5): 599-602.
- Li F, Lin Y C. Design of narrow bandpass filter used in DWDM system for optical fiber communication[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2001, 21(5): 599-602.
- [9] 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.
- [10] 贾钰超, 李刚, 白玉琢, 等. 窄带滤光片设计中通带半宽度、矩形度和陡度的影响因素研究[J]. 红外技术, 2012, 34(8): 448-452.
- Jia Y C, Li G, Bai Y Z, 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.
- [11] 熊玉卿. 超窄带滤光片制作技术[J]. 真空与低温, 2005, 11(3): 125-130.
- Xiong Y Q. Preparation technique of ultranarrow bandpass optical thin film filters[J]. Vacuum and Cryogenics, 2005, 11(3): 125-130.
- [12] Kajikawa M, Kataoka I. A design method of optical bandpass filters [J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(9): 1720-1727.
- [13] 张晓晖, 韩小兵. WDM 光纤通信用窄带滤光片膜系补偿膜层的最优化设计[J]. 海军工程大学学报, 2003, 15(1): 42-45, 60.
- Zhang X H, Han X B. Optimum design of the compensate layers of a narrow band filter used in WDM optical fiber communication system[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2003, 15 (1): 42-45, 60.
- [14] 顾培夫, 陆巍, 陈海星, 等. 膜厚监控系统的光谱宽度对窄带滤光片性能的影响[J]. 光学学报, 2004, 24(2): 251-254.
- Gu P F, Lu W, Chen H X, et al. Effect of spectral width of thickness-monitoring system on performance of narrow-band filters [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(2): 251-254.
- [15] 朱美萍, 易葵, 高慧慧, 等. 一种提高膜厚监控精度的新方法 [C]//中国光学学会 2006 年学术大会论文摘要集. 北京: 中国光学学会, 2006: 683.
- Zhu M P, Yi K, Gao H H, et al. A New Method to improve the monitoring accuracy of film thickness[C]//Abstracts of 2006 Academic Conference of China Optical Society. Beijing: The Chinese Optical Society, 2006: 683.
- [16] 潘永强, 吴振森, 杭凌侠. 光学薄膜界面粗糙度互相关特性与光散射[J]. 中国激光, 2008, 35(6): 916-920.
- Pan Y Q, Wu Z S, Hang L X. Optical thin films interfaces roughness cross-correlated properties and light scattering[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(6): 916-920.
- [17] 张金豹, 史成淳, 耿浩. 窄带干涉滤光膜光谱曲线变形分析与修正技术[J]. 国防制造技术, 2021(1): 28-31.
- Zhang J B, Shi C B, Geng H. Deformation analysis and correction technology of spectral curve of narrow-band interference filter film [J]. Defense Manufacturing Technology, 2021(1): 28-31.
- [18] 黎明. DWDM 固体腔窄带滤光片的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- Li M. Research on DWDM solid cavity narrow bandpass filters[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.

Development of LWDM Narrow-Band Filter Membrane for 5G Communication

Zhang Jing¹, Liu Haicheng^{1*}, Fu Xiuhua^{1,2}, Wang Shengqi³, Wang Yibo¹, Liu Junqi¹,
Zhang Tianxiang¹, Yang Fei⁴, Li Gang⁵

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

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

³Guang Chi Technology (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200444, China;

⁴Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;

⁵Yunnan North Optical Technology Co., Ltd., Kunming 650216, Yunnan, China

Abstract

Objective With the advent of the information age, optical communication has been widely used in the communication field owing to its high transmission rate, significant information capacity, good security performance, and strong anti-interference capability. Narrowband filter films, which are crucial components of multiplexers and demultiplexers, are the key components of optical communication. With the development of optical communication, the demand for narrowband filter films are increasing. Currently, research on narrowband filter films is relatively well-established both domestically and internationally. However, there a scarcity of literature regarding the preparation of fine-wavelength division multiplexing (LWDM) filter films via thermal evaporation. Moreover, the LWDM filter film comprises a substantial number of layers, making it vulnerable to monitoring errors and spectrum distortion. Consequently, the development of narrowband filter films that possess a narrow bandwidth, small passband ripple, low insertion loss, and a large cutoff transmission isolation, and that meet the technical requirements of modern optical communication is of great research significance and has immense application value.

Methods High-quality filter films for optical communication were deposited on K9 substrates using electron-beam thermal evaporation and ion-assisted deposition techniques. The film was designed using Ta₂O₅ and SiO₂ selected as high- and low-refractive-index materials, respectively, owing to their stable properties. The factors affecting the half-width of the passband of the F-P film

system were theoretically calculated and analyzed, and the film system was adjusted according to Baumeister's theory. Multiple single-cavity F-P film systems were connected in series to improve the spectral rectangularity, and a matching layer was added to reduce the passband ripple, resulting in the completion of the LWDM narrowband filter film design. The design of the LWDM narrowband filter film was completed. A SPOC-1300TCI vacuum coater was used to prepare the filter film. The effects of deposition rate and ion source energy on the surface roughness of Ta_2O_5 and SiO_2 were investigated. The surface roughness of Ta_2O_5 was smaller than that of the substrate, while that of SiO_2 was larger. The surface roughness of both materials gradually decreased and leveled off as the deposition rate increased. The effect of the ion source energy on the surface morphology of the film layer was minimal. Through the above single-layer experiments, the deposition rates of Ta_2O_5 and SiO_2 were chosen to be 0.4 and 0.8 nm/s, respectively. These rates were chosen while considering the influence of the deposition rate on the surface roughness of the film layer and challenges in monitoring the thickness of the film layer.

Results and Discussions Owing to the numerous film layers and long coating time required for the narrow-band filter film, mechanical structures such as the vacuum degree of the vacuum chamber, material evaporation characteristics, correction plate alterations under long-term high-temperature environments, and the actual thickness of the film layer are inconsistent with the design. Moreover, there can be spectral distortions due to the unbalanced optical thickness ratio of Ta_2O_5 . To address this issue, we propose a debugging method for achieving high-precision film thickness uniformity and spectral consistency (Fig. 9). According to the equivalent layer theory of the membrane system, the F-P membrane system with two cavities is equivalent to a single-cavity F-P membrane system; that is, the first and second cavity layers are equivalent to the reflection layer on both sides of the single-cavity F-P membrane system, and the original coupling layer is equivalent to the spacer layer on both sides of the single-cavity F-P membrane system. When the coupling layer in the 44 L double-cavity membrane system is changed from L to 2 L, it increases the thickness of the spacer layer and the interference order of the membrane system. As a result, transmission peaks appeared at the central wavelength. The wavelength spacing between adjacent transmittance peaks is not equal and changes with the material type and film thickness. The error of the optical thickness of Ta_2O_5 and SiO_2 can be quickly analyzed by inverse analysis of the coating results of special film systems (Figs. 10 and 11). The correction plate is adjusted according to the analysis results to adjust the ratio of the optical thickness of Ta_2O_5 and SiO_2 to improve the narrow-band filter film spectra. The film thickness monitoring method is studied, and a new monitoring method is proposed to monitor the accuracy of photoelectric polarization method. The optical direct monitoring method is used to monitor the film thickness during the plating process (Fig. 5); the substrate real-time measurement curve is fitted, and the film thickness is monitored according to the fitting results. Moreover, the coupling layer and non-regular film layer are monitored by the crystal-controlled average thickness method, which improves the monitoring accuracy.

Conclusions Based on the above debugging, the resulting filter film has bandwidths of 4.1 and 6.0 nm at -0.2 dB and -27 dB, respectively, a maximum insertion loss of 0.14 dB in the passband, and a passband ripple of 0.04 dB, and a bandwidth of 6.0 nm at -27 dB, thereby satisfying the technical requirements of narrowband filter film for LWDM.

Key words optical communication; fine wavelength division multiplexing; optical direct monitoring method; crystal-controlled average thickness method; passband ripple