

文章编号: 1001-3806(2006)03-0320-03

# 大口径 1064nm 窄带滤光片的研制

范卫星<sup>1</sup>, 赵战刚<sup>1</sup>, 王平秋<sup>2</sup>, 周九林<sup>2</sup>, 马 孜<sup>2</sup>

(1 奥普镀膜技术(广州)有限公司, 广州 510730 2 西南技术物理研究所, 成都 610041)

**摘要:** 采用现代光通信 DWDM 镀膜技术, 选用  $Ta_2O_5/SiO_2$  氧化物硬质薄膜材料, 研制成功大口径、高性能 1064nm 窄带滤光片。给出了从膜系设计到试生产及膜层的性能方面的一些实验结果, 表明产品的各项性能指标达到或超过了客户的要求, 现已定型批量生产。

**关键词:** 薄膜; 1064nm 滤光片; 峰值透过率; 超窄带

**中图分类号:** O484.4<sup>+</sup>1 **文献标识码:** A

## Study on large-size narrow-band 1064nm filters

FAN Wei-xing<sup>1</sup>, ZHAO Zhan-gang<sup>1</sup>, WANG Ping-qiu<sup>2</sup>, ZHOU Jiu-lin<sup>2</sup>, MA Zi<sup>2</sup>

(1. Optimal Coatech (Guangzhou) Co Ltd, Guangzhou 510730, China 2. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

**Abstract** The large-size narrow-band 1064nm filters with high performance are developed with  $Ta_2O_5/SiO_2$  oxide hard film material using some unique techniques in optical communication dense wavelength division multiplex (DWDM). The results of the film design, trial production and the performance are presented. All the results prove that the filters reach, even exceed the requirements of clients. Now the filters are fabricated in a batch production.

**Key words** thin film; 1064nm filter; peak transmittance; ultranarrow-band

### 引 言

1064nm 窄带滤光片是光电应用和激光技术中极重要的光学元器件。由于其使用的领域要求滤光片在苛刻的使用条件下有良好的性能, 这些性能包括: 大口径面积内膜层的均匀性好 (产品直径  $\geq 150$ mm 以上, 波长公差 1064nm  $\pm 1$ nm)、高 峰 值 透 过 率 (大 于 90%)、高带外抑制比 (小于  $10^{-3}$ )、超窄通带 (5nm ~ 6nm)、中心波长稳定性好 (零漂移)、膜层牢固度高等。

由于此滤光片的透射率要求高、带宽窄、中心波长容差小, 常规光学镀膜技术<sup>[1,2]</sup>研制滤光片的方法已经很难实现, 需要采用类似于现代光通信密集光波分复用 (dense wavelength division multiplex, DWDM) 镀膜技术<sup>[3]</sup>才能达到要求。

DWDM 系统<sup>[4]</sup>是光通信中增加带宽、提高通信容量的核心技术。薄膜干涉滤光片是目前已知最有效的实现信号通道的复用与解复用功能的关键器件<sup>[5]</sup>。光通信中对于 DWDM 滤光片的要求极为苛刻。

### 1 膜系设计和工艺材料

1064nm 滤光片要求将 1064nm 的激光选择通过, 使近紫外、可见光以及近红外的光量全部截止。具体指标要求如表 1 所示。

Table 1 1064nm narrow-band optical filter technology index requirements

item	index
FWHM	5 nm $\pm$ 1nm
center wavelength	1064nm $\pm$ 1nm
peak transmittance	> 90%
outside bandpass transmittance	< $10^{-3}$
cut-off region	200nm ~ 1058nm & 1072nm ~ 1200nm

这样高指标要求的滤光片只能使用带通型多腔滤光片的设计<sup>[6,7]</sup>。选取全介质 F-B 型多腔窄带滤光片的膜系, 镀膜材料使用  $Ta_2O_5$  和  $SiO_2$  氧化物材料。其带外抑制比小于  $10^{-3}$ , 采用两腔的膜系。设计膜系如下:  $SUB \backslash (HL)^4 H 4 LH (LH)^4 L (HL)^4 H 4 LH (LH)^3 L O 7242H O 58 IL \backslash \backslash IR, N_{sub} = 1.52, N_{air} = 1, N_h = 2.13, N_l = 1.46$

通过后面几层非规整膜层优化膜系曲线平坦度, 使滤光片光谱透过曲线更加接近客户理想的要求。如图 1 和图 2 所示。

从图 2 可看出, F-B 型多腔窄带滤光片 930nm 附

作者简介: 范卫星 (1970-), 男, 硕士, 现从事光学薄膜、光通信器件技术研发。

E-mail: weixing-fan@opdm.com.cn

收稿日期: 2005-04-13 收到修改稿日期: 2005-09-30

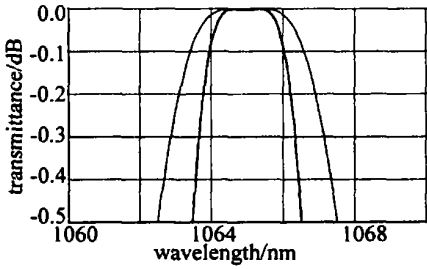


Fig 1 Spectral transmittance of the designed filter

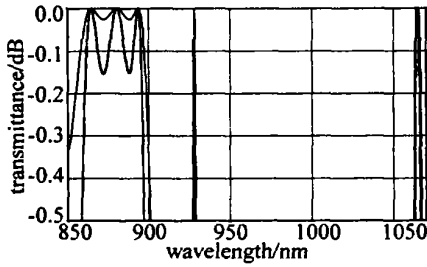


Fig 2 Short-wave peaks and spectral transmittance of the designed filter

近有 1 个次峰凸起。滤光片基底采用型号为 HWB850 有色玻璃可以截止掉 800nm 以下的光谱,但还需要镀制一个辅助膜系将 800nm ~ 950nm 波段的光(次峰)截止掉。辅助膜系使用  $TiO_2$  和  $SiO_2$  材料<sup>[8 9]</sup>, 非规整膜系,膜层数为 40 层。

设计曲线见图 3 该膜系不仅能保证有较高的光学截止度,还能够对 1064nm 波段处起到增透的效果。保证最终产品的高透过率。

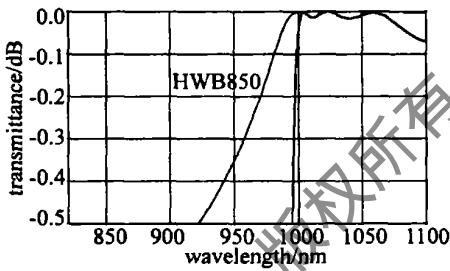


Fig 3 Spectral transmittance of the edge filter

作者为此研发了一种特殊的展宽截止带的方法,采用特殊的膜系设计结构,可将滤光片的短波截止带拓展到 770nm,长波截止带拓展到 1700nm,从而单面镀膜就能达到客户的设计要求。使用  $Ta_2O_5$  和  $SiO_2$  设计如图 4 所示。

单面镀膜主要针对长波方向有截止要求的特殊产

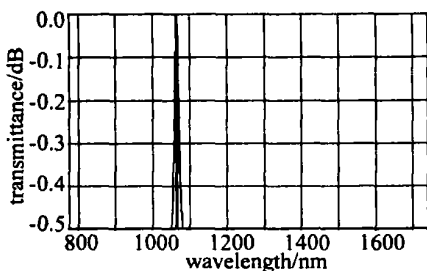


Fig 4 Spectral transmittance of broad-band edge filter

品,膜层数共计 180 层,镀膜虽然能够实现,但其成品率低,成本太高。所以作者采用了双面镀膜的方案。

作者在镀膜中使用日本 OPTORUN 公司的 NBPF-2 DWDM 滤光片镀膜设备,采用了美国 DN 公司的 16cm RF 射频高能离子源,直接用氧离子辅助沉积的镀膜方法,形成的膜层致密稳定,填充密度高,没有观察到吸收的现象。膜厚的监控采用透射式光学监控,用 C\5 晶控仪稳定沉积速率和膜厚控制。

## 2 膜参数的优化和误差分析

对于半宽度为 5nm 的滤光片的膜系,其容差非常小。图 5 是在大面积上监控点和非监控点两种材料有

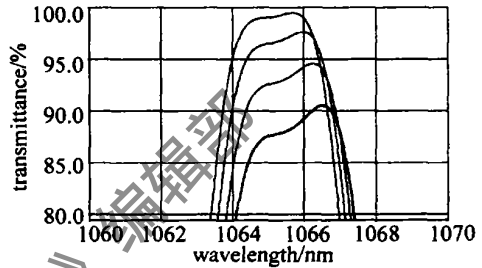


Fig 5 Thickness-error effects on transmittance characteristic

1%, 2%, 3%, 4% 误差的理论模拟曲线,很明显,当有 4% 误差时,在背面有理论增透膜的情况下,峰值透过率理论上只有 90.49%,加上 F-B 型多腔窄带滤光片镀膜时一些膜层(耦合层,中间层)的镀膜误差,以及反面截止膜的影响,其透过率将进一步降低。

大口径滤光片产品设计要求中心波长变化小,整个面积上波长容差为  $\pm 1nm$ ,相当于误差 2%,因而从理论上讲,要达到 2% 的膜层分布误差才能达到客户要求。通过调整工艺参数保证膜层分布误差,诸如增加修正板、调节电子枪光斑、调整离子源参数等方法才能使膜层具有良好的均匀性。

## 3 测试结果和膜层性能实验及结果

结果测试曲线如图 6 和图 7 所示。在滤光片上的中心波长分布如图 8 所示。

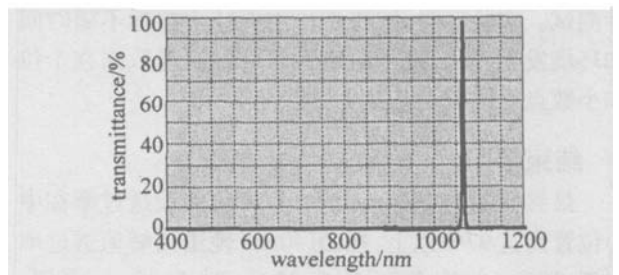


Fig 6 Measured spectral transmittance of filter (measure range 400nm ~ 1200nm)

测量结果表明,在滤光片中间位置峰值透过率为 97%, 140nm 范围内峰值透过率大于 95%,中心波长在 140nm 位置上的波长变化 1.8nm,产品使用

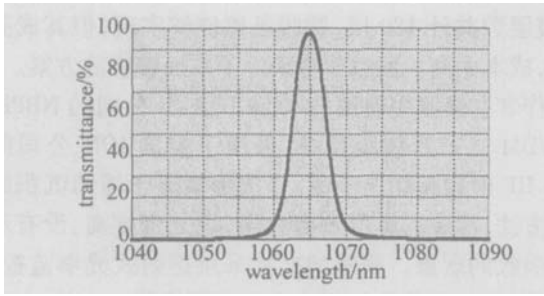


Fig 7 Measured spectral transmittance of filter (measure range 1040nm ~ 1090nm)

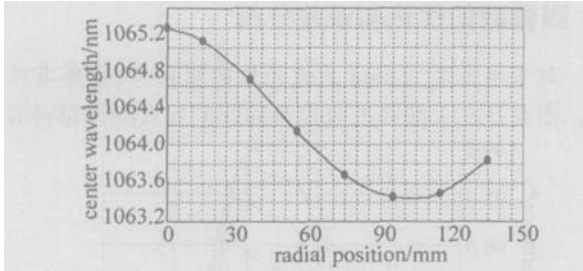


Fig 8 Radial distribution of center wavelength

日本岛津 UV-3101PC 和美国 LAMDA-900 分光光度计测试。从测试结果看,主膜系和辅助膜系都具有良好

的光学性能。

#### 4 环境实验

1064nm 窄带滤光片使用在各种特殊的场合和恶劣的气候环境,故膜层的牢固度和技术指标稳定性非常重要。为此,特别采用国际普遍适用的环境实验以验证膜层的技术稳定性和牢固度。实验使用同样工艺的 / 20mm 和 / 16mm 产品做实验。

环境实验内容包括:高温 + 60°C; 低温 - 40°C; 潮湿环境 (在充满水份和非常潮湿的环境下放置); 应力筛选 (反复高低温实验, 每 1 个循环包括高温 + 60°C 恒温 1h 低温 - 40°C 恒温 1h 共进行 5 个循环以上, 总时间 10h~ 15h, 来看膜层应力有无变化); 时效实验 (通过一年四季温度环境和时间放置看膜层技术指标有无变化)。

表 2 是主要技术指标 (峰值中心波长  $\lambda_m$ 、峰值透射率  $T_m$  和半峰全宽  $\Delta\lambda$ ) 在环境实验前后的测量数据。由于滤光片通带窄, 测量时要选择合适的测量参

Tabel 2 Technical parameters before and after environmental test

filter No	$\lambda_m$		$T_m$		$\Delta\lambda$		appearance	
	before test	after test	before test	after test	before test	after test	before test	after test
13	1064.2	1064.0	97.196	96.655	5.2	5.2	OK	OK
39	1064.6	1064.6	95.389	95.145	5.2	5.2	OK	OK
40	1064.4	1064.9	95.516	98.398	5.2	5.2	OK	OK
43	1063.7	1063.5	98.803	98.365	5.2	5.2	OK	OK
48	1065.1	1064.9	95.981	95.915	5.2	5.2	OK	OK
46	1064.7	1064.9	94.484	95.318	5.3	5.3	OK	OK
12	1064.6	1064.6	96.620	97.124	5.3	5.3	OK	OK
47	1064.1	1064.1	96.614	97.33	5.2	5.2	OK	OK
49	1065.4	1064.9	94.957	94.709	5.4	5.4	OK	OK

数 (分光光度计的测量参数), 测量中心波长和峰值透射率有一定的测量重复性偏差。

环境实验和主要技术指标在西南技术物理研究所计检中心检测, 使用最新美国 LAMDA-900 分光光度计测试。实验证明, 该滤光片主要技术指标不随时间和环境发生变化, 技术稳定性很好。测量数据在个位和小数点后的微小差异是测量误差所致。

#### 5 结束语

最终研制的 1064nm 滤光片峰值波长透射率在中心位置高达 97% 以上, 在 / 140mm 范围内峰值透射率大于 95%, 半峰全宽在 5.05nm 到 5.35nm 之间, / 140mm 面积内中心波长变化 1.8nm, 主要技术指标达到或超过了客户极高的要求。由于实验前充分的准备, 加上多年研发 DWDM 镀膜技术和窄带滤光片积累的经验 and 工艺以及生产设备良好的性能, 产品研发比

较顺利。产品一次性通过了环境实验测试要求, 并很快形成量产。使用类似的膜系设计和工艺技术可以批量生产高水平的可见光和近红外波段窄带滤光片。

#### 参 考 文 献

- [1] ZHOU J L, YIN Sh B Optical coating technology [M]. Beijing National Defense Industry Press 1974. 257~ 353 (in Chinese).
- [2] ZHANG Y D, YUAN P, MA Z G. Ultrannarrow-band optical filter [J]. Laser Technology, 1999, 23(5): 257~ 261 (in Chinese).
- [3] PAN X J, ZHOU M. High-performance filters for dense wavelength-division-multiplex fiber optic communications [J]. Society of Vacuum Coaters, 1998, 34(8): 505~ 856.
- [4] SUN X J, ZHANG Sh J The theory and test of transmission system for DWDM [M]. Beijing Posts and Telecom Press 2000. 150~ 189 (in Chinese).
- [5] CHEN D Y, ZHANG R J Study of 100GHz narrow-bandpass filters in the fiber optical communication [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2003, 22(1): 75~ 76 (in Chinese).

(下转第 326 页)

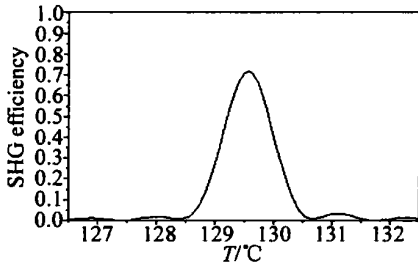


Fig 9 Relationship between SHG efficiency and offset of temperature type phase match ( $L=1080\text{ nm}$ ,  $w_0=56\mu\text{m}$ ,  $P=2.4\text{ kW}$ )

算所得可接收温度 (FWHM) 为  $1.14^\circ\text{C}$ , 文献 [1] 中略低于  $2^\circ\text{C}$ , 符合得比较好。

### 3 结论

对平面波形式的耦合波方程引入了修正因子, 使得常微分形式的耦合波方程可以描述聚焦光斑大小和聚焦位置对倍频效率的影响。利用文献 [1] 中 LBO 倍频掺 Yb 光纤激光的试验数据, 对分析模型进行了检验, 结果和文献 [1] 中的试验数据获得了比较好的吻合。进一步利用改进后的耦合波方程, 对掺 Yb 光纤整个发射光谱 ( $980\text{ nm} \sim 1100\text{ nm}$ ) 范围内, LBO 晶体的倍频特性进行了深入分析。结果显示: LBO 晶体在 Yb 光纤的整个发射谱段都可以达到 NCPM 条件。随着基频光波长增大, 倍频效率会有小幅度下降; 可接收温度宽度  $\Delta T$ 、可接收线宽  $\Delta\lambda$  有比较大的展宽; 而可接收角  $\Delta\theta$ 、 $\Delta\varphi$  虽然也呈现增加趋势, 但变化很小。综合以上结论, 在利用 LBO 对掺 Yb 光纤激光倍频时, 采

取非临界相位匹配, 并选用较长的基频光波, 易于得到比较理想的倍频效果。

### 参考文献

- [1] LIU A P, NORSEN M A, MEAD R D. 60W green output by frequency doubling of a polarized Yb-doped fiber laser [J]. Opt Lett 2005, 30 (1): 67~69.
  - [2] KONNO S, KOJIMA T, FUJIKAWA S *et al*. High-brightness 138W green laser based on an intracavity-frequency-doubled diode-side-pumped Q-switched Nd:YAG laser [J]. Opt Lett 2000, 25(2): 105~107.
  - [3] XUE D G, YAO J Q, GUO L. 104W laser diode pumped intracavity frequency doubled Nd:YAG green light laser [J]. Acta Optica Sinica 2004, 24(7): 925~928 (in Chinese).
  - [4] JEONG Y, SAHU J K, PAYNE D N *et al*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36kW continuous-wave output power [J]. Optics Express 2004, 12(25): 6088~6092.
  - [5] PASK H M, CARMAN R J, HANNA D C *et al*. Ytterbium-doped silica fiber lasers versatile sources for the 1~1.2 $\mu\text{m}$  region [J]. IEEE JQ E Selected Topics 1995, 4(1): 2~13.
  - [6] SOH D B S, CODEMARD C, WANG S *et al*. A 980nm Yb-doped fiber MOPA source and its frequency doubling [J]. IEEE Photonics Technology Letters 2004, 16(4): 1031~1034.
  - [7] LOU Q, ZHOU J, WANG Z. Double-cladding fiber laser and frequency doubling with PPLN [J]. SPE, 2004, 5460: 31~34.
  - [8] YAO J Q. Nonlinear optical frequency conversion and tunable laser technology [M]. Beijing: Science Press, 1995, 27, 44, 50 (in Chinese).
  - [9] DMITRIEV V G, NIKOGOSYAN D N. Handbook of nonlinear optical crystals [M]. 3rd ed. Berlin, New York: Springer, 1999, 27.
  - [10] KATO K. Temperature-tuned  $90^\circ$  phase-matching properties of  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  [J]. IEEE JQ E, 1994, 30(12): 2950~2952.
- (上接第 322 页)
- [6] LU W, CHEN X Sh. Ultra narrow band pass optical filter plate and film thickness produce method [P]. China Patent 1354371, 2002-06-19 (in Chinese).
  - [7] HAGEDORN H, LOTZ A, PECHER P *et al*. Ultra narrow bandpass filters produced by plasma assisted deposition in optical interference coating [J]. JO S A Technical Digest 2001, WA 4: 1~4.
  - [8] MACLEOD H A. Thin-film optical filters [M]. 3rd ed. USA: Macleod, 2000, 626~680.
  - [9] TANG Q. Optical coating film design through manufacture method [J]. Society of Technology Information, 2002, 3(1): 1~26 (in Chinese).