

# 多功能光纤端面激光宽带减反射膜的应用研究

李美萱<sup>1,2</sup>, 王 丽<sup>1</sup>, 王美娇<sup>2</sup>, 冷雁冰<sup>1</sup>, 董连和<sup>1</sup>

(1. 长春理工大学, 吉林 长春 130022; 2. 长春理工大学光电信息学院, 吉林 长春 130012)

**摘要:**在光学系统中,设计了一种新型的近红外光纤宽带激光减反射膜,应用波段为 800 ~ 1300 nm,能够同时适用于多波段大功率半导体激光器并具备较高损伤阈值。通过选择合适的光学材料,利用 TFCalc 软件仿真,调整最佳的工艺参数,采用热蒸发式真空镀膜机及 RF 离子源辅助沉积的方法,解决了小口径光纤端面的清洁和低温镀膜时膜层的牢固性等问题,实验采用 Agilent CARY6000i 型光波测量系统对镀膜后的样品进行光谱分析,实验结果显示,该减反射膜在 800 ~ 1300 nm 平均透射率为 99.2%。分别用单管 808 nm、980 nm 和 1064 nm 半导体激光器为光源测得多模光纤镀膜后的输出功率较镀膜前均有明显提高。该膜层有效地提高了大功率半导体激光器与光纤的耦合效率具有更好的应用价值和实用意义。

**关键词:**真空镀膜;多模光纤;减反射膜;半导体激光器;损伤阈值;耦合效率

**中图分类号:** O484.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2016.10.021

## Application research on multifunction fiber end laser broadband antireflection film

LI Mei-xuan<sup>1,2</sup>, WANG Li<sup>1</sup>, WANG Mei-jiao<sup>2</sup>, LENG Yan-bing<sup>1</sup>, DONG Lian-he<sup>1</sup>

(1. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. College of Optical and  
Electronical Information, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** A novel near-infrared fiber broadband laser antireflection film within 800 ~ 1300 nm band is designed, and it can apply to multi-band high-power semiconductor lasers and has high damage threshold. By selecting a suitable optical material, simulating with TFCalc software, adjusting the optimal process parameters, and using thermal evaporation vacuum coating instrument and RF ion source assisted deposition method, the problems of end face cleaning of small-diameter fibers and coating adhere strength of low temperature coating are solved. The sample spectra after coating are analyzed by Agilent CARY6000i optical measurement system. The results show that the average transmission of this antireflection film is 99.2% within the range of 800 ~ 1300 nm. Taking single tube 808 nm, 980nm and 1064 nm semiconductor lasers as the light source respectively, the output power of multimode fiber after coating has improved significantly. This film can effectively improve the coupling efficiency of high-power semiconductor laser and optical fiber, and has good application values.

**Key words:** vacuum coating; multimode fiber; antireflection film; semiconductor laser; damage threshold; coupling efficiency

**基金项目:**国家自然科学基金合作项目(No. 11474037)资助。

**作者简介:**李美萱(1984 -),女,讲师,博士,主要研究方向为微结构光学元件与薄膜波导术,光纤通信技术等。E-mail: limeixuannuc@163.com

**通讯作者:**董连和(1958 -),男,教授,博士,主要研究方向为先进光学制造技术,微细加工理论与工艺技术,微光学与应用等。E-mail: custdong@126.com

**收稿日期:**2016-02-19; **修订日期:**2016-03-25

## 1 引言

20 世纪 80 年代研制出超晶格和量子阱技术后,使高功率的半导体激光器(LD)得到迅猛发展,LD 以它光电转换效率高、使用寿命长、直接调制能力强和性价比高等特点在光信息存取、激光材料、生物和医学领域发挥了重要作用<sup>[1-2]</sup>。但 LD 的缺陷是光束发散角大、光斑不均匀不能直接输出,需要与光纤耦合使用。

目前国内的光纤耦合器件与国外产品的主要差距在器件的加工工艺上,因此如何改善光纤镀膜的加工工艺,提高大功率 LD 与光纤的耦合效率成为越来越被重视的课题<sup>[3]</sup>。本文在口径 200  $\mu\text{m}$  的多模光纤端面制备 800 ~ 1300 nm 的宽带减反射膜,可同时适用于多波段大功率半导体激光器。

## 2 膜系设计

根据增透膜的理论进行膜系设计,首先应选取合适的薄膜材料。

### 2.1 膜料的选择

多模光纤的折射率为 1.4571,由于多模光纤端面面积小又是激光膜,因此对镀膜材料的要求非常苛刻,各层膜材料的选取原则如下:

- (1) 所选的光学材料在 950 ~ 1350 nm 无吸收。
- (2) 适宜的折射率,良好的光学稳定性<sup>[4]</sup>。
- (3) 良好的化学稳定性和真空热稳定性。
- (4) 力学性能好,内应力低,机械强度高,在多层介质膜中要考虑材料的应力搭配。
- (5) 不潮解,不吸湿。
- (6) 与基体结合性能好,多层膜中要考虑材料之间的结合力。
- (7) 杂质含量低,不允许存在有吸收的杂质。
- (8) 有适宜的蒸发源进行蒸发。
- (9) 制备方便,价格低廉。

考虑工艺因素,选择采用折射率稳定、吸收小、具有良好机械附着力的 M1 (Pro6011 +  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 作为与基底材料之间的粘结层,可提高膜层牢固性。选择散射小、化学性稳定、受环境影响小且损伤阈值高的 H1 ( $\text{TiO}_2$  +  $\text{ZrO}_2$ ) 作为高折射率材料。常把  $\text{MgF}_2$ 、 $\text{SiO}_2$  作为低折射率材料<sup>[5]</sup>,由于光纤塑料外包层熔点较低,因此镀膜时温度不能超过 120  $^\circ\text{C}$ 。而  $\text{MgF}_2$  在 250  $^\circ\text{C}$  以下是软膜, $\text{SiO}_2$  具有很高的机械性能,因而选用  $\text{SiO}_2$  为低折射率材料<sup>[5]</sup>。

### 2.2 膜系设计

对于光学薄膜来说,其多层膜特征矩阵为:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos\delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin\delta_j \\ i\eta_j \sin\delta_j & \cos\delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $B$  为入射介质的电场强度与基片电场强度的比值;  $C$  为入射介质的磁场强度与基片电场强度的比值;  $\delta_j$  为各层膜的位相厚度;  $\eta_j$  为各层膜的等效导纳;  $\eta_s$  为基片材料的等效导纳。

$$R = \left| \frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right|^2 \quad (2)$$

式中,  $R$  为系统的反射率;  $\eta_0$  为入射介质的等效导纳,设计减反射膜的原则是  $R$  越小越好。

当选定光学材料、入射波长范围后,将高透射带的约束条件代入软件获得最优的膜系结构,最终膜系设计结果为非规整膜系为 S10.9010M 1.5209H 0.4008L 0.1704H 1.0764L|A。其中 M、H 和 L 分别代表为 M1、H4 和  $\text{SiO}_2$ 。

光纤双面镀膜的理论透过率曲线如图 1 所示。

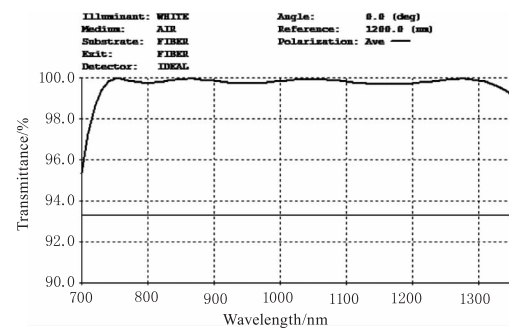


图 1 非规整膜系镀膜前后对比曲线

Fig. 1 Comparison curves of non-regular coating before and after coating

曲线为多模光纤端面双面镀膜后的理论透过率曲线,直线为多模光纤未镀膜时的理论透过率曲线。

## 3 镀膜实验

薄膜制备工作是在国产的热蒸发式真空镀膜机上,该设备可以监控膜层几何厚度的仪器是 MDC-360C 石英晶体膜厚控制系统。在 RF 离子源辅助沉积下,获得致密度很高的薄膜<sup>[6]</sup>。具体工艺如下:

### 1) 光纤端面的检查与清洁

光纤端面质量会影响激光器的输出功率,因此保持光纤端面的清洁是整个工艺加工过程中都需要注意的问题,在装配、调试、镀膜准备过程中的任意环节都有可能对光纤端面造成污染<sup>[7]</sup>。在无尘车间里先用无尘纸加乙醇乙醚混合溶液将光纤表面和夹具擦拭干净再进行装调,在显示倍率为 400 倍的光纤显微镜下检查光纤的洁净度,再通过 LCD 屏幕显示光纤端面的情况。镀膜前再用离子喷枪吹掉表

面的灰尘并保证真空室内清洁。

2) 光纤外包层温度的控制

光纤是由纤芯、包层和涂敷层组成。当基底温度超过 120 °C 时涂敷层就会熔化,如图 2 所示。

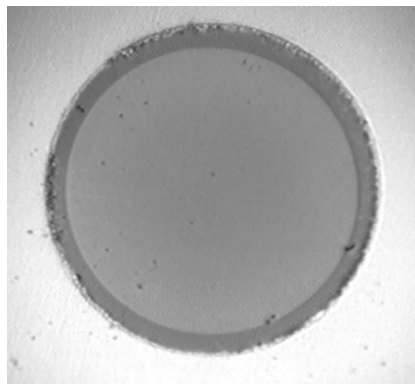


图2 塑料外包层熔化

Fig.2 plastic cladding melting

在光纤旁放置一温控传感器,当基片温度高于 110 °C 时系统自动报警随即进行调试。

3) 膜料的蒸镀

受夹具的影响光纤端面距离蒸发源较近,若材料沉积速率低,晶核生长缓慢,聚集密度低<sup>[8]</sup>。沉积速率快,应力积累,易产生喷点。

应适当调整光纤到蒸发源的距离,调整膜料光斑的大小和蒸发速率,在保证成膜质量的情况下,蒸发速率越慢越好且连续蒸发。

4) 合格样品

利用温控传感器实时监控光纤端面温度,当真空度抽到  $4.0 \times 10^{-4}$  Pa 时,打开离子源,氧分压控制在  $3 \times 10^{-3}$  Pa 开始蒸镀。图 3 为满足要求的单模光纤端面示意图。

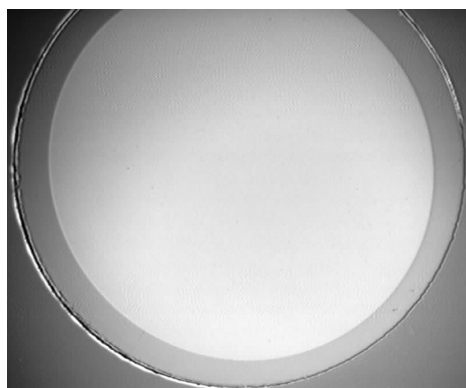


图3 镀膜后合格样品

Fig.3 Qualified samples after coating

4 测试结果与分析

采用 Agilent CARY6000i 型光波测量系统对经过镀膜后的光谱进行分析,光谱曲线如图 4 所示。

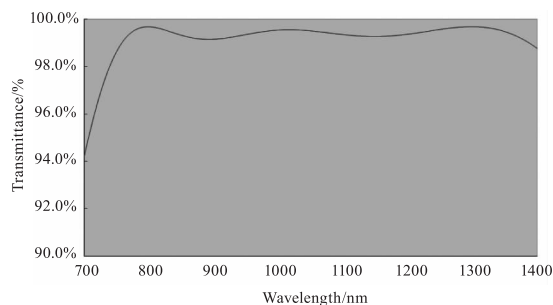


图4 多模光纤镀增透膜的透过率曲线

Fig.4 Transmission curve of AR coated multimode fiber

由实测数据可知,该光谱在波长 800 ~ 1300 nm 平均透射率为 99.2%,比仿真设计值低约 2%,但光谱分布范围、带宽基本一致。将镀后的合格光纤与激光器进行耦合,耦合后输出的光斑如图 5 所示。

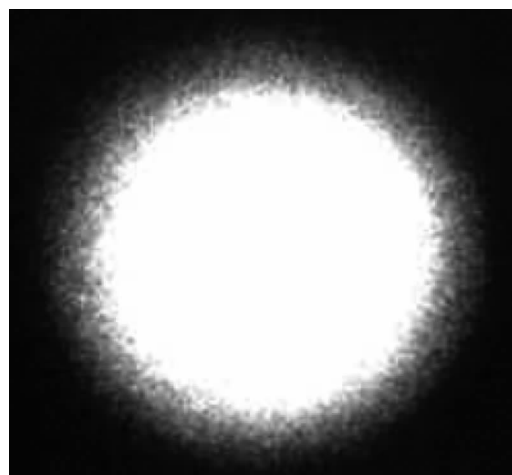


图5 激光器与光纤耦合后的光斑

Fig.5 Spot pattern when laser and fiber coupled

当以单管 808 nm 半导体激光器为光源时,测得多模光纤端面镀膜前后的输出功率如表 1 所示。

表1 以单管 808 nm 半导体激光器为光源 光纤镀膜前后的输出功率

Tab.1 The output power of the fiber using a single tube 808nm semiconductor laser as the light source before and after coating

Working current /mA	Collimation power/mW	Output power before coating /mW	Output power after coating /mW
600	226	209	220
1000	639	572	605
2000	1700	1490	1574

以单管 808 nm 半导体激光器为光源时,多模光纤镀膜前后输出功率平均提高了 5%,满足使用要求。

当以单管 980 nm 半导体激光器为光源时,测得多模光纤端面镀膜前后的输出功率如表 2 所示。

表 2 以单管 980 nm 半导体激光器为光源光纤镀膜前后的输出功率

Tab. 2 The output power of the fiber using a single tube 980nm semiconductor laser as the light source before and after coating

Working current /mA	Collimation power /mW	Output power before coating /mW	Output power after coating /mW
600	210	157	169
1000	570	425	449
2000	1510	1050	1124

当以单管 980 nm 半导体激光器为光源时,多模光纤镀膜前后输出功率平均提高了 5%,满足使用要求。

当以单管 1064 nm 半导体激光器为光源时,测得多模光纤端面镀膜前后的输出功率如表 3 所示。

表 3 以单管 1064 nm 半导体激光器为光源光纤镀膜前后的输出功率

Tab. 3 The output power of the fiber using a single tube 1064 nm semiconductor laser as the light source before and after coating

Working current /mA	Collimation power /mW	Output power before coating /mW	Output power after coating /mW
1000	612	501	531
1500	984	773	851
2000	1330	1057	1140

当以单管 1064 nm 半导体激光器为光源时,多模光纤镀膜前后输出功率平均提高了 6%,满足使用要求。

为了保证光学元件的可靠性,对样品进行了环境试验,参照国标,按照使用要求测试内容如下:

(1)附着力测试:使用 scotch 测试透明胶带,紧贴在膜层上,出去空气泡,迅速撕掉胶带,重复 10 次,薄膜未被剥离。

(2)高低温测试:将镀件放入 80 ~ -60 °C 的试验箱内,保持 48 h,膜层未有明显变化<sup>[9]</sup>。

(3)潮湿实验:将镀件暴露于温度为 (48.9 ± 2.2) °C,相对湿度 95% 的环境试验箱中 48 h,膜层

表面完好,光谱曲线没有明显误差<sup>[10]</sup>。

## 5 总 结

结合基底材料的镀膜工艺选择合适的光学材料,调整镀膜工艺参数实现了低温镀膜的可行性,所镀制的薄膜能够满足光学仪器的使用要求。在多模光纤端面上镀宽带增透膜,不仅提高了光纤的光能透过率,也使多模光纤与半导体激光器之间的耦合效率得到明显的提高,进而对红外光纤的实用化起到了非常积极的作用。

## 参考文献:

- [1] FU Xiuhua, SUN Yingjie, LIU Dongmei, et al. Study and fabrication of visible and infrared broadband antireflection coating[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 339 - 343. (in Chinese)  
付秀华, 孙英杰, 刘冬梅, 等. 可见与近红外宽带减反射膜的研制[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 339 - 343.
- [2] YANG Yongliang, FU Xiuhua, LIU Guojun, et al. Study and fabrication of multi-wavelength Laser antireflection film using new mixed material[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(10): 156 - 161. (in Chinese)  
杨永亮, 付秀华, 刘国军, 等. 采用新型混合材料的多波长激光减反射膜的研制[J]. 中国激光, 2011, 38(10): 156 - 161.
- [3] LI Meixuan, YANG Yongliang, FU Xiuhua, et al. Study of 1064nm laser anti-reflection film on the end of fiber[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(1): 91 - 94. (in Chinese)  
李美萱, 杨永亮, 付秀华, 等. 1064nm 光纤端面激光减反射膜的研制[J]. 激光与红外, 2010, 40(1): 91 - 94.
- [4] Palmer J R. Theoretical model for high power annular continuous wave laser beams on uncoated optical components-transient temperature distribution[J]. SPIE, 1993, 1997: 494 - 515.
- [5] Bodemann A, Kaiser N, Kozlowski, et al. Comparison between 355nm and 1064nm damage of high grade dielectric mirror coatings [J]. Proc. SPIE, 1996, 2714: 395 - 403.
- [6] D R Gibson, E M Waddell, A D Wilson. Ultradurable phosphide-based antireflection coating for sand and rain erosion protection [J]. Proc. SPIE, 1994, 33(3): 957 - 966.
- [7] LIU Chunling, WANG Chunwu, WANG Guangde, et al.

- Process investigation of H4 thin film prepared by electron beam evaporation and application on laser diodes cavity coatings[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(12): 3140-3144. (in Chinese)
- 刘春玲,王春武,王广德,等. 电子束蒸镀 H4 膜工艺及其在 808nm 激光器腔面膜上的应用[J]. 中国激光, 2010, 37(12): 3140-3144.
- [8] XUE Chunrong, YI Kui, WEI Chaoyang, et al. Optical properties of vacuum ultraviolet and deep ultraviolet region substrate materials[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(2): 287-290. (in Chinese)
- 薛春荣,易葵,魏朝阳,等. 真空紫外到深紫外波段基底材料的光学特性[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(2): 287-290.
- [9] ZHENG Zhenrong, GU Peifu, CHEN Haixing, et al. Design and preparation of super Broadband antireflection Coating[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(7): 2026-2029. (in Chinese)
- 郑臻荣,顾培夫,陈海星,等. 超宽带减反射膜的设计和制备[J]. 光学学报, 2009, 29(7): 2026-2029.
- [10] GAO Ting, QU Yi, ZHENG Xiaogang, et al. Preparation of super broadband antireflection coating on the end of fiber [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2014, 25(4): 687-691. (in Chinese)
- 高婷,曲轶,郑晓刚,等. 光纤端面宽带减反射膜的制备[J]. 光电子·激光, 2014, 25(4): 687-691.