

# 光纤激光器光学膜设计与制备

梅禹珊,付秀华,杨永亮,魏孜洵,石 澎  
(长春理工大学,吉林 长春 130022)

**摘要:**针对激光在传输过程中的光能损失,本文根据光学薄膜理论,设计制备了减反射膜和抗激光的高反射膜,并对激光膜的镀膜材料、膜系设计、沉积工艺及离子辅助沉积等参数进行了深入研究。研究表明,制备的减反膜的反射率 < 0.2%,激光以 25°~65°入射时高反射膜的反射率 >99.7%。对 50 μm 光纤和 K9 玻璃镀膜前后的输出功率测试显示多模光纤的功率平均提高了 50%,而 K9 玻璃的反射功率提高到 99.85%;另外,制备的光纤激光器光学膜有效地提高了激光损伤阈值,解决了低温冷镀的膜层牢固性问题。

**关键词:**真空镀膜;减反膜;高反膜;多模光纤  
**中图分类号:** O484.1; TN248.9 **文献标识码:** A

## Design and preparation of optical films for fiber lasers

MEI Yu-shan, FU Xiu-hua, YANG Yong-liang, WEI Zi-xun, SHI Peng

(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** For the energy loss of laser transmitting, an anti-reflection film and a high anti laser reflection film were designed and prepared according to the theory of optical thin film. Coating materials of laser films, coating design, deposition techniques and ion assisted deposition parameters were researched in detail. Results shows that the reflectance of the antireflectance coating is less than 0.2% and the average reflectance of the high reflectance film is higher than 99.7% when the laser incidence is 25°~65°. Furthermore, the experimental tests on 50 μm optical fiber and K9 glass before and after coatings indicate that the average power of optical fiber has increased by 5% and the reflective power of the K9 glass has improve to 99.85%. Moreover, the preparation of optical films of the fiber laser effectively raises the laser damage threshold, and solves the problem of the film firmly under low temperature deposition.

**Key words:** vacuum coating; antireflective coating; high reflective film; multi-mode fiber

## 1 引言

在军用光学仪器中,通常采用多模光纤来传输激光。一般情况下,多模光纤材料的端面约有3.46%的光能损失,这多通过光学镀膜的方法来解决。现代军事装备中,常用的激光波长为808和1064 nm<sup>[1,2]</sup>。针对这两个激光波长,本文提出了解决了膜层抗激光损伤和低温沉积工艺等问题的方法。另外,本文亦考虑高反射膜入射角度变化范围较大,膜层较厚等问题,研究了减少膜层吸收及提高其平均反射率的方法<sup>[3]</sup>。

## 2 膜料选择及膜系设计

根据使用要求,首先选择合适的抗高激光损伤薄膜材料进行实验,在设计和制备过程中优化工艺参数,同时解决大角度入射时反射率降低及波长漂移的问题。

### 2.1 膜料选择

多模光纤的平均折射率为1.457 1,由于光纤口径面积较小(仅为50 μm),考虑膜层的附着力差及应力匹配等因素,将复合材料M<sub>1</sub>(锆和氧化铝的混合材料)作为光纤基底与减反射膜材料之间的粘结层,以便提高膜层牢固性,同时与其它材料构成了减反射膜系,提高了光纤端面的透过率<sup>[4]</sup>。

对于高反射膜,在可见及近红外波段常用的高折射率材料有HfO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, H<sub>4</sub>, ZrO<sub>2</sub>等, HfO<sub>2</sub>具有较高的损伤阈值但易喷溅, ZrO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>的牢固性好但易失氧, H<sub>4</sub>是氧化钛与氧化镧的混合材料, H<sub>4</sub>在沉积的过程中折射率随着沉积工艺参数的变化范围较小,并且具有较高的激光损伤阈值,故选择H<sub>4</sub>作为高折射率材料。SiO<sub>2</sub>具有很高的机械性能,膜层牢固,经试验与H<sub>4</sub>材料应力较匹配,因而选用SiO<sub>2</sub>为低折射率材料<sup>[5-7]</sup>。

### 2.2 膜系设计

#### 2.2.1 减反射膜的设计

常用的减反射膜的膜系设计有周期膜系和非周期膜系。对于多模光纤要满足808和1064 nm同时增透,可以设计宽带减反射膜系,也可以只考

虑这两个波长的单点增透。然而对制备技术来说,宽带增透的成品率高于单点增透。

对于宽带减反膜,首先采用周期膜系进行设计。根据薄膜理论,对基底折射率低于1.62的基底材料,通常采用的是3层膜系,表达式为Sub|M 2H|L|Air,其中M、H和L分别表示为Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>和MgF<sub>2</sub>的1/4中心波长的光学厚度。由于高温下光纤塑料外包层会熔化,所以光纤镀膜是在低温下进行的,即基底温度低于100℃。如果采用上述3层膜的材料在光纤端面镀膜,膜层很容易脱落。经过实验证明,选择M<sub>1</sub>, H<sub>4</sub>和SiO<sub>2</sub>作为3层膜的材料,加之离子辅助沉积,保持膜系不变,其牢固性很好。利用TFCalc膜系设计软件得到理论反射率曲线如图1所示。

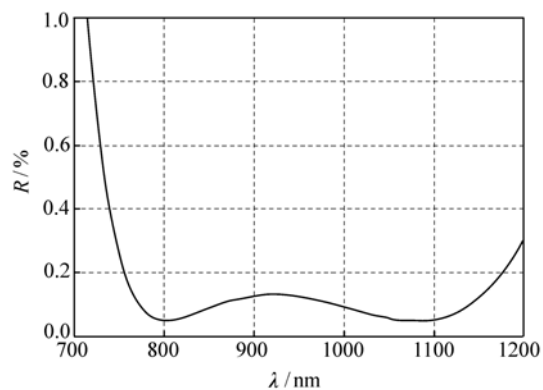


图1 周期膜系的理论曲线

Fig. 1 Theoretical curve of cycle films

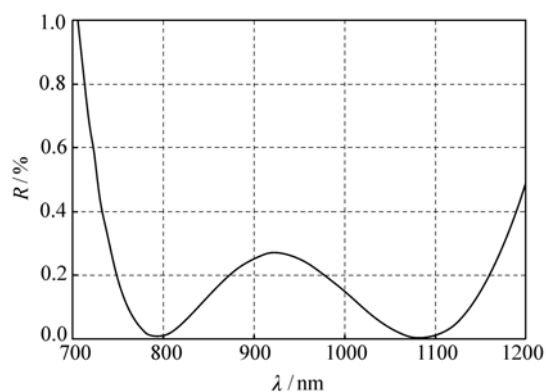


图2 非周期膜系的理论曲线

Fig. 2 Theoretical curve of non-cycle films

其次,采用非周期膜系设计,其膜系为Sub

11.285M 2.413H 1.185L|Air,理论反射率曲线如图2所示。

由理论设计曲线可以看出,周期膜系比非周期膜系的透射带宽,通常利用光电极值法来控制周期膜系的膜厚,利用石英晶来控制非周期膜系的膜厚。光电极值法控制的是膜层的光学特性,而石英晶体只能控制膜层的物理厚度,但材料的折射率是随着工艺的变化而变化的,所以用石英晶体来控制膜厚有较大的误差,故选择周期膜系Sub|M 2H L|Air,通过多次实验获得较稳定的制备工艺,实现波长808和1064 nm处同时增透。

### 2.2.2 高反射膜的设计

高反射膜要满足激光在入射角为 $25^\circ \sim 65^\circ$ 时,808和1064 nm同时反射,膜系设计时采用两个膜堆叠加展宽反射带,经过膜系软件优化得到膜系表达式为:Sub|0.910H 1.022L 0.978H 0.969L 0.978H 0.999L 1.021H 0.870L 1.011H 1.012L 0.978H 0.991L 1.011H 0.972L 1.011H 1.000L 0.958H 0.978L 0.989H 1.000L 1.115H 1.354L 1.336H 1.296L 1.310H 1.297L 1.339H 1.310L 1.051H 1.269L 1.310H 1.555L 1.280H 1.286L 1.298H 1.324L 1.284H 1.309L 1.324H 1.566L 1.300H|Air,其中H和L分别代表 $H_4$ 和 $SiO_2$ 的 $1/4$ 中心波长的光学厚度。用Mcalc膜系设计软件得到的高反射膜的理论反射率曲线如图3所示。

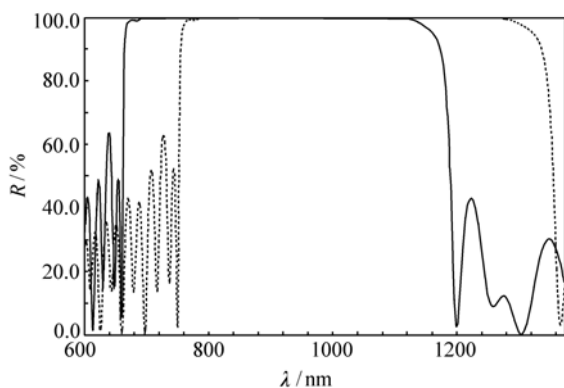


图3 高反射膜的光谱理论反射率曲线

Fig.3 Reflectivity curves based on high reflective film spectrum theory

图3中虚线为激光在 $25^\circ$ 角入射时的理论曲线,实线为激光在 $65^\circ$ 角入射时的理论曲线,而当

激光在 $25^\circ \sim 65^\circ$ 内入射时,反射率曲线在这两条曲线之间。从图中可以看出,当激光在 $25^\circ \sim 65^\circ$ 入射时,808和1064 nm处的理论反射率达到了99.9%。

## 3 激光膜制备

### 3.1 减反射膜制备

采用成都天星公司生产的TXX-700真空镀膜机制备薄膜,该设备配置了双晶控探头、IC/5石英晶体膜厚控制系统和OMS光学膜厚控制系统。

当基底温度超过 $100^\circ\text{C}$ 时光纤的外包层就会熔化,熔化后的光纤端面如图4所示。因此,基底温度一般控制在 $80^\circ\text{C}$ 以内。在镀膜材料沉积过程中,电子枪产生的热量会提高光纤的温度,基底温度还会升高 $10^\circ\text{C}$ 左右,为了提高膜层与基底之间的附着力又不使基底温度超过 $100^\circ\text{C}$ ,在光纤放入真空室之前,对材料进行预熔,把光纤放入后再用加热器将基底温度控制在 $70^\circ\text{C}$ 以内,采用考夫曼离子源轰击约10 min,再进行减反射膜的沉积。

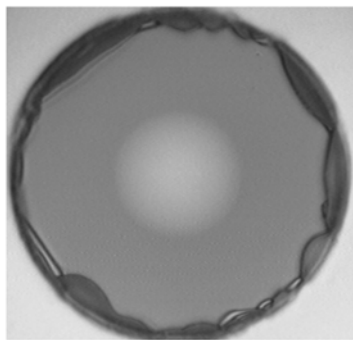


图4 温度高于 $100^\circ\text{C}$ 时的光纤端面效果图

Fig.4 Fiber end face renderings at temperature higher than  $100^\circ\text{C}$

### 2.2 高反射膜制备

由于高反射膜的层数多,膜层较厚,而且每层膜的厚度不同,所以选择晶控法控制膜层厚度。而要减少控制误差,必须获得在同等工艺条件下的材料的折射率色散分布,实验获得的 $H_4$ 和 $SiO_2$ 的色散曲线如图5、图6所示。

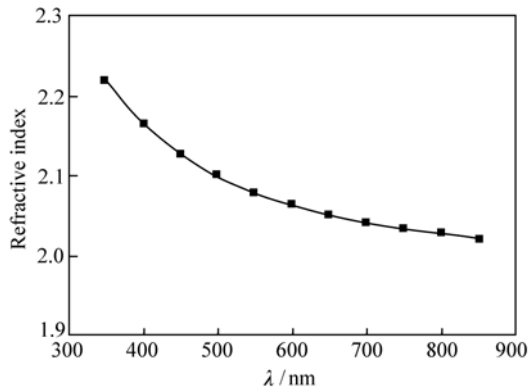


图5 基底温度为 200 °C 时的  $H_4$  色散曲线

Fig.5  $H_4$  dispersion curve under substrate temperature of 200 °C

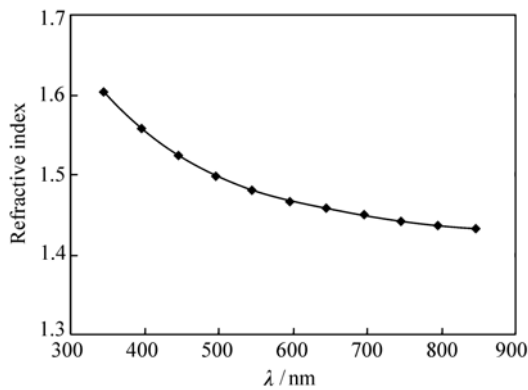


图6 基底温度为 200 °C 时的  $SiO_2$  色散曲线

Fig.6  $SiO_2$  dispersion curve under substrate temperature of 200 °C

经过实验确定其工艺参数为:基底温度 200 °C,  $H_4$  的沉积速率为 0.3 nm/s,  $SiO_2$  的沉积速率为 0.7 nm/s。

镀制过程中,由于  $SiO_2$  蒸发速率很快,需注意控制  $SiO_2$  蒸发速率的平稳性,以减少相关膜厚控制误差。对于  $H_4$ ,镀制过程中要充分预熔,适当控制电子枪束流,以免束流过大或者材料局部温度过高造成材料喷溅。为了提高薄膜的致密性,减少波长的漂移,采用考夫曼离子源辅助沉积,合理控制  $H_4$  和  $SiO_2$  的离子能量。由于  $SiO_2$  在真空中加热蒸发时会分解失氧,形成高吸收的亚氧化硅薄膜,于是在蒸镀  $SiO_2$  时必须对真空室充氧,离子源的充氧量为  $6 \text{ cm}^3/\text{min}$ 。

## 4 测试与分析

### (1) 光学特性测试

采用日本岛津 UV-3150 分光光度计进行测试。由于光纤端面口径很小,无法用该测试设备进行测试,因此选择与多模光纤材料相同的  $\Phi 20$  的测试片代替光纤。实验光谱曲线如图 7 所示。

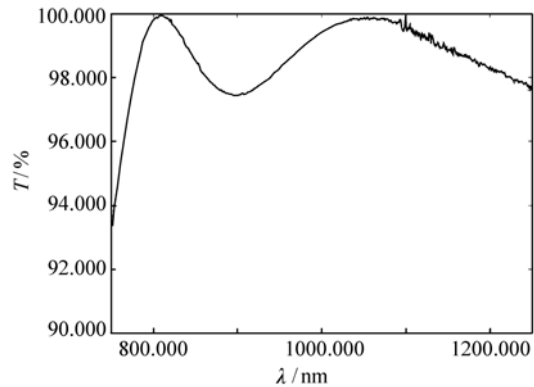


图7 在 K9 为基底的测试片上测得的单面镀增透膜的透过率曲线

Fig.7 Transmittance curve of K9 coating antireflective film on one side

而高反射膜是在 K9 玻璃上镀制的,可直接进行测试,光谱曲线如图 8 所示。

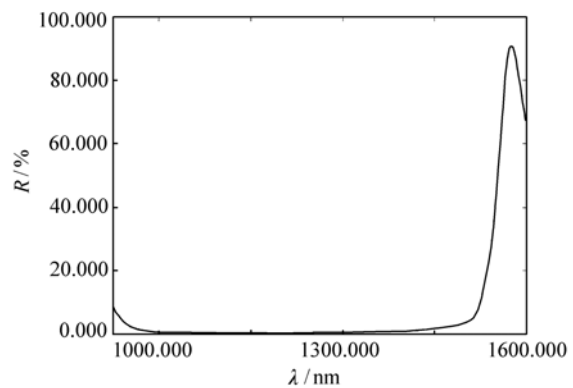


图8  $0^\circ$  入射时 K9 基底上单面镀膜测得的反射率曲线

Fig.8 Measured reflectivity curve of single surface coated on K9 substrate

以 808 nm 单管芯 YAG 激光器为光源测得 50  $\mu\text{m}$  光纤和 K9 玻璃镀膜前后的输出功率如

表1和表2所示。

表1 光纤镀膜前后的输出功率

Tab.1 Output power of fibers before and after coatings

激光器的工作 电流/mA	准直功 率/mW	镀膜前输出 端功率/mW	镀膜后输出 端功率/mW
500	213	203	207
1 000	579	552	579
2 000	1 350	1 249	1 332

表2 K9玻璃镀膜前后的反射功率

Tab.2 Reflection power of K9 glass before  
and after coatings

激光器的工作 电流/mA	准直功 率/mW	镀膜前输出 端功率/mW	镀膜后输出 端功率/mW
500	210	209	212
1 000	590	588	592
2 000	1 340	1 330	1 355

根据808和1 064 nm光纤激光器为光源的光纤镀膜前后的输出功率,可以计算出镀膜前后多模光纤的功率平均提高了5%,而K9玻璃的反

射功率提高到99.85%,满足使用要求。

(2)附着力测试:参照美国军标,用NICHIBAN CT-18胶带紧贴镀膜表面,然后沿膜面垂直方向迅速拉起,重复5次,未有脱膜现象。

(3)抗激光测试:利用半脉宽20 ns,1 064 nm峰值密度500 MW/cm<sup>2</sup>的激光辐射膜层150次后,膜层无损坏。

(4)机械强度试验:用手持式擦拭具,在橡皮摩擦头外裹两层干燥脱脂纱布保持4.9 N(500 g)压力下顺着同一轨迹对膜层进行摩擦。膜层表面无损伤。

## 5 结 论

设计制备了减反射膜和抗激光的高反射膜,采用离子辅助沉积技术,通过对工艺参数(包括辅助沉积工艺)的选取,在不影响膜层光谱特性的前提下,很大程度地提高了膜层的抗激光损伤能力,同时保证了激光膜的稳定性。所得的膜层既有良好的光谱性能,又有较好的机械稳定性和较高的抗激光损伤阈值。

## 参考文献:

- [1] 李隆,董武威,史彭,等.激光二极管阵列侧泵浦Nd:YAG板条的热效应[J].光学精密工程,2008,16(11):2120-2126.  
LI L, DONE W W, SHI P, *et al.*. Thermal effect of diode bar side-pumped Nd:YAG slab[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11):2120-2126. (in Chinese)
- [2] FAN ZH X, ZHAO Q, QIU H, *et al.*. Laser-induced damage in optical coatings and laser condition technology[J]. *SPIE*, 1997, 3244:469-474.
- [3] 卜轶坤,赵丽,郑权,等.高损伤阈值激光反射镜的设计方法[J].红外与激光工程,2006,35(2):183-186.  
BU Y K, ZHAO L, ZHENG Q, *et al.*. Design method of high damage threshold laser mirror[J]. *Infrared and Laser Eng.*, 2006, 35(2):183-186. (in Chinese)
- [4] 付秀华,董连和,付新华,等.红外增透与保护膜技术的研究[J].激光与红外,2006,36(12):1162-1164.  
FU X H, DONG L H, FU X H, *et al.*. Study of infrared AR and protecting coating technology[J]. *Laser Infrared*, 2006, 36(12):1162-1164. (in Chinese)
- [5] 钟迪生.真空镀膜—光学材料的选择与使用[M].沈阳:辽宁大学出版社,2001.  
ZHONG D SH. *The Selection and Use of Vacuum Coating-Optical Materials*[M]. Shenyang: Liaoning University Press, 2001. (in Chinese)
- [6] 唐晋发,顾培夫.现代光学薄膜技术[M].杭州:浙江大学出版社,2006:103-114.  
TANG J F, GU P F. *Modern Optical Thin Film Technology*[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006:103-114. (in Chinese)
- [7] KAJIKAWA M T, KATAOKA I Z. A design method of optical band-pass filters[J]. *J. Light Wave Technol.*, 1997, 15(9):1720-1722.
- [8] MACLEOD H A. Optical thin film coating design[J]. *SPIE*, 1996, 2776:1-8.

- [9] PESQUE J J,BOUCHE D P,MITTRA R. Optimization of multilayer anti-reflection coatings using an optimal control method[J]. *IEEE*,1992,40(9):1789-1796.
- [10] 潘奕捷,林家明,商庆坤,等. 光学低通滤波器的频率特性和光谱特性[J]. *光学技术*,2005,31(4):513-515.  
PAN Y J,LIN J M,SHANG Q K,*et al.*. Frequency and spectrum characteristic of the optical low passfilter[J]. *Opt. Technique*,2005,31(4):513-515. (in Chinese)

作者简介:梅禹珊(1986—),女,吉林长春人,硕士研究生,主要从事光学薄膜技术方面的研究。

E-mail:meiyushan5433@163.com

付秀华(1963—),女,山东滨州人,教授,主要从事光学薄膜技术及半导体激光器制造工艺方面的研究。

E-mail:goptics@126.com

## 《光机电信息》征稿启事

本刊由中国光学学会、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所主办,科学出版社出版。

本刊征集光学和应用光学、激光和光电子学、微纳科技和精密工程、材料科学、电磁学和电子学、仪器仪表、信息科学和技术等几大领域如下形式的文章:

### 1. 研究信息快报

本栏目主要报道最新研究成果、阶段新结果、片段新结果的介绍或说明,不要求是纯学术论文。目的是为那些尚未能形成正式研究论文,但希望把已有的最新研究成果、阶段或片段新结果抢先发表的科研工作者提供一个平台,保护广大科研人员的知识产权。主要内容包括研究背景简介、研究过程或实验过程简述、观察到的结果、数据及相关信息说明、评论等,附图表数据等,也可附参考文献(一般不要求)。本栏目发表的论文数据不影响在正式发表论文时使用。

本栏目出版周期:收稿日期为每月5日之后,25日之前收到,下月即出版发表。如为当月5号之前收到,当月发表。

### 2. 研究快报

本栏目主要征集研究新成果的快速报道。要求具有如下内容:摘要、关键词、研究背景(引言)、研究过程或实验过程、研究结果、参考文献。

### 3. 研究评论

主要是对当前最新研究结果或研究动态的评论或展望,也可是基于他人研究结果的二次开发或更深层次的研究结果报道。

### 4. 综述文章

(1)综述本领域或本学科的研究成果和进展、发展动态和趋势。

(2)作者本研究群体的研究工作综述。

### 5. 研究论文

征集研究新结果的学术论文。

### 6. 应用开发类论文

接受各类大学、研究所、企业自主研发的新产品性能报道和新应用报道;新型器件在系统应用结果方面的报道等。是反映企业研发创新和对自身产品的再认识的能力、并能够让用户更好地了解产品性能、拓展应用范围的手段。本栏目论文具有产品推广广告作用。

### 7. 成果信息和研发信息

本栏目主要为大学、研究所等研发部门发布研究成果信息或项目工程研发信息;企业需要开发或攻关的项目信息等。目的是为研发部门和企业之间架起沟通桥梁。

### 8. 各类形式的企业宣传、广告,具体来电来函商谈。

本刊做各类宣传、广告,欢迎媒体利用。“好酒也怕巷子深”——您的产品多一份广告就会多一份收益,本刊广告效率高,宣传范围广。纸版的广告+电子版的广告——更值得客户信赖,更能为您培养潜在的中、远期客户。

网上投稿:E-mail:xxfw@ciomp.ac.cn;xxfwome@sina.com;gjdxw@gmail.com

挂号邮寄:邮编:130033 地址:长春市东南湖大路3888号《光机电信息》编辑部

电话:0431-86176853

《光机电信息》编辑部