

## 三维腹腔镜端面宽带增透膜的研制

魏孜洵 付秀华 石 澎 梅禹珊  
(长春理工大学,吉林 长春 130012)

**摘要:**根据由多组镜片组成的三维腹腔镜对高透过率和不失真成像的要求,研究并选择了合适的薄膜材料;采用电子束真空镀膜加以离子辅助沉积系统,利用膜系设计软件完成了宽带增透膜的非周期膜系设计。通过调整镀膜工艺参数并采用光控与晶控同时监控的方法,减少了膜厚控制误差,成功地在多组镜片上镀制了宽带增透膜。测试试验显示,制备的膜层在400~700 nm波段的平均反射率<0.5%,而且颜色不失真,膜层牢固,抗腐蚀效果较好,满足医用光学仪器的使用要求。

**关键词:**三维腹腔镜;光学增透膜;真空镀膜;离子辅助沉积  
**中图分类号:**O484.1 **文献标识码:**A

## Fabrication of broadband AR coating for three-dimensional laparoscopic facet

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

(*School of Opto-electronic Engineering, Changchun University of  
Science and Technology, Changchun 130012, China*)

**Abstract:** According to the requirements of a three-dimensional laparoscope consisting of many group lenses for the high transmittance and distortionless imaging, the appropriate film materials were chosen. Then, a coating design software was taken to realize the nonperiod coating system design of the anti-reflective coating by using the vacuum evaporation method and an ion assistant deposition system. By adjusting parameters of coating film and using the technique of optical control and crystal control simultaneously, the thick control error was reduced and the anti-reflection coating was coated on the lenses that were used in the laparoscopy successfully. The test results demonstrate that the average reflectance of the prepared coating is less than 0.5% and it shows color distortionless, securely layers and better effects of resistant to corrosion. These results meet operating requirements of medical optical instruments.

**Key words:** three-dimensional laparoscopy; optical anti-reflection film; vacuum evaporation coating; ion assistant deposition

## 1 引言

现代光学技术的飞速发展对医用光电元件提出了越来越高的要求<sup>[1]</sup>,由此光学薄膜在医疗器械领域的应用也日益广泛<sup>[1]</sup>。三维腹腔镜是医学诊断的常用器械,它由冕牌和轻火石玻璃等材料组成,并在表面镀制可见增透膜来提高其可见光能量的透过率和光学元件的成像质量,因此,研制高性能的可见宽带增透膜是三维腹腔镜等医疗光学设备的一个关键技术。目前,增透膜的研究大都集中在可见单点增透,且大多采用周期膜系设计及制备,这些膜系在单组镜片上的透过率较高,但是三维腹腔镜多由多组甚至十多组镜片胶合而成,要求每组镜片的透过率尽量低且不能存在颜色失真,常用的周期膜系和薄膜性能并不合适,因此研究非周期膜系的宽带增透膜的设计和制备对三维腹腔镜的使用和发展具有重要意义。

本文针对三维腹腔镜的使用要求,对宽带增透膜进行了研究,进行了膜系设计,并镀制了相应的薄膜,同时解决了颜色失真和膜层牢固度的问题。

## 2 膜层材料选取与膜系设计

### 2.1 膜层材料的选择

由于不同的光学元件对光学薄膜的要求不同,所以根据光学元件的要求选择不同的膜层材料是薄膜镀制的关键环节。光学薄膜材料是能够在真空中蒸发并沉积于基片上形成薄膜的化学物质。介质和半导体薄膜材料虽然种类很多,然而完全适用的光学薄膜材料并不多,膜层材料一般应具有高的透明度、稳定的折射率、强的机械牢固度、好的化学稳定性、稳定的蒸发速率等<sup>[2]</sup>。

考虑三维腹腔镜的特点,镀制的膜层要求在400~700 nm波段的平均反射率<0.5%,而且颜色不失真,膜层牢固,抗腐蚀效果好,因此,所选薄膜材料应该在要求波段透明范围适宜,无吸收,同时兼要考虑膜层材料与基底材料的附着力,膜层之间的结合力,应力的匹配等。由于增透膜系的设计要求,至少要选择一种高折射率材料( $n_H$ )和

一种低折射率材料( $n_L$ ),本文选出符合要求的高折射率材料有 $ZrO_2$ 、 $TiO_2$ 、 $H_4$ 、 $Ta_2O_5$ 等,与之匹配的低折射率材料有 $MgF_2$ 、 $SiO_2$ ,中折射率材料为 $Al_2O_3$ 。最后,综合考虑三维腹腔镜的使用要求,选择 $H_4$ 作为高折射率材料, $MgF_2$ 为内层低折射率材料, $SiO_2$ 为外层低折射率材料。其中 $H_4$ 是新兴的复合氧化物材料,密度为 $5.9\text{ g/cm}^3$ ,熔点为 $1\ 800\text{ }^\circ\text{C}$ ,在真空下蒸发温度为 $2\ 200\sim 2\ 300\text{ }^\circ\text{C}$ 。 $H_4$ 的折射率与基底温度有关, $\lambda = 0.55\ \mu\text{m}$ , $T_s = 30\text{ }^\circ\text{C}$ 时, $n = 1.97$ ;  $\lambda = 0.55\ \mu\text{m}$ , $T_s = 100\text{ }^\circ\text{C}$ 时, $n = 2.08$ ;  $\lambda = 0.55\ \mu\text{m}$ , $T_s = 300\text{ }^\circ\text{C}$ 时, $n = 2.11$ ;在 $0.38\sim 10\ \mu\text{m}$  $H_4$ 无吸收,仅在 $2.9\ \mu\text{m}$ 时会由于 $H_4$ 的吸湿性有部分吸收。图1所示为不同基底温度时 $H_4$ 的折射率。另外, $H_4$ 在镀制过程中为熔融状态,蒸发速率稳定,其折射率随温度的变化相对较小。

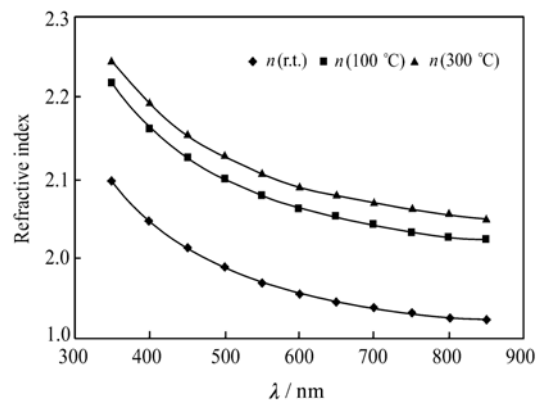


图1 不同基底温度时 $H_4$ 的折射率

Fig.1 Refractive index of  $H_4$  layers

$MgF_2$ 是可见区折射率最低的材料<sup>[3]</sup>,与高折射率材料结合增透效果好于其他低折射率材料。在膜层的制备过程中, $MgF_2$ 膜层的厚度对镀制结果会产生很大的影响,所以,需要精确控制 $MgF_2$ 的蒸发速率,另外,腹腔镜端面在使用的过程中与很多腐蚀性液体接触,如人体血液,因此要求膜层具有较强的抗腐蚀能力。 $SiO_2$ 的抗腐蚀能力、机械性能、牢固度强于 $MgF_2$ ,所以选取 $MgF_2$ 作为内层低折射率材料, $SiO_2$ 作为外层低折射率材料<sup>[4]</sup>。

### 2.2 膜系设计

三维腹腔镜通过10组镜片胶合而成,且工作

在酸碱环境中(人体内),因此设计的过程中要考虑多种影响因素。进行膜系设计时要考虑(1)膜层总数过多会产生很大的累积误差,从而影响膜层的反射率及波形曲线,因此膜层的总层数不宜过多;(2)整个膜层之间的敏感层不应过薄,以免造成设备误差而影响膜层的反射曲线;(3)各层的厚度在制备时应易于监控,以便减少监控误差。

膜系设计时首先考虑了周期膜系,通常对 K9 玻璃而言400~700 nm 常用膜系为 Sub|L1 M 2H L2|A 膜系<sup>[5]</sup>,其中 Sub 代表基底,A 代表空气,L1 代表  $\text{SiO}_2$ ,M 代表  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,H 代表  $\text{ZrO}_2$ ,L2 代表  $\text{MgF}_2$ <sup>[6]</sup>,其理论光谱曲线如图 2 所示。

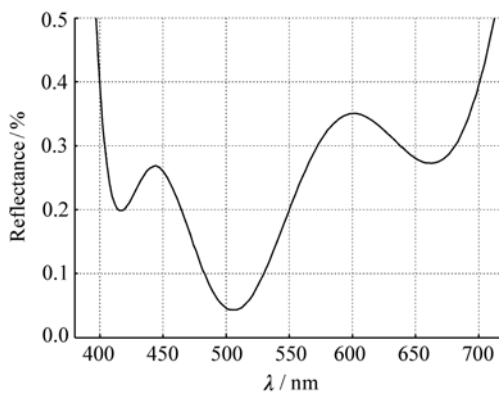


图2 周期膜系理论光谱曲线

Fig. 2 Theory spectroscopic curve for periodic film stack

由图 2 可以看出,在整个可见光范围内曲线有两个较高的反射峰,这虽然在理论上满足透射率要求,但实际观测其像表面呈淡绿色,暗示镜片胶合后会产生较大的颜色失真,也就是说周期膜系很难达到色彩平衡,所以本设计放弃周期膜系,选择了非周期膜系。

基于双有效界面法进行了非周期膜系设计,使选定的膜层从膜系中分离出来,整个膜系组合可以用两个有效界面表示<sup>[7]</sup>。用膜系设计软件进行辅助设计,考虑制备控制等因素的误差,经过多次优化得到膜系 Sub|0.26H 0.32L1 0.88H 0.15L1 0.64H 0.67L1 0.31L2|A,其中 H 代表  $\text{H}_4$ ,L1 代表  $\text{MgF}_2$ ,L2 代表  $\text{SiO}_2$ 。400~700 nm 光谱曲线如图 3 所示,其可见波段平均反射率约为 0.2%。

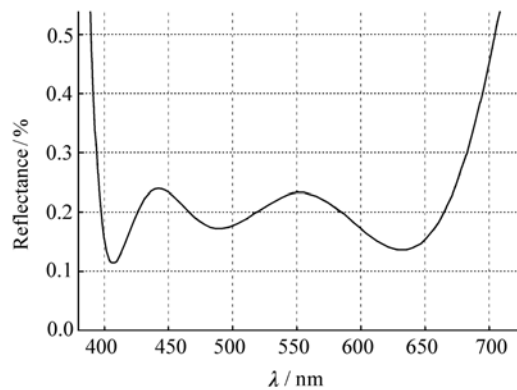


图3 设计的光谱曲线

Fig. 3 Designed spectroscopic curve

### 3 膜层的制备

#### 3.1 制膜设备

制膜设备采用了天星真空科技研制的 700 型镀膜机,其主要由膜厚控制仪、离子源、真空室和蒸发系统组成,如图 4 所示。膜厚控制系统采用了进口的 IC/5 膜厚控制仪,该系统分为光控和晶控两部分,其中晶控是利用石英晶体振荡频率变化来测量薄膜质量厚度的。离子源采用中国科学院北京空间研究所研制的考夫曼离子源,通过合

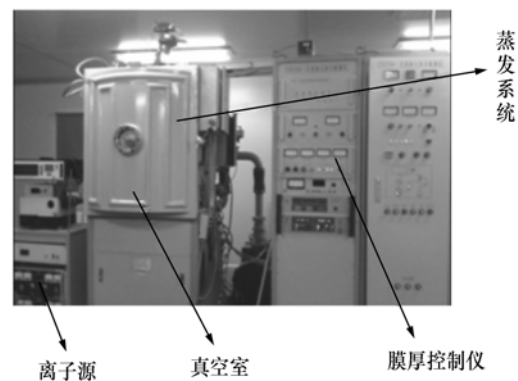


图4 TXX700-2 镀膜机

Fig. 4 TXX700-2 coating system

理控制离子能量,可以提高沉积薄膜的致密度,改善光学和机械性能<sup>[8]</sup>。蒸发系统采用电子束进行热蒸发,通过高能量的电子束轰击膜料,可以蒸发一些用电阻很难蒸发的高熔点材料,电子束可

产生3 000~4 000 °C的高温。真空室靠机械泵和扩散泵系统相互配合来获得实验要求的真空度,用热电偶计对真空度进行测量。

### 3.2 镀膜工艺及参数

经过多次实验及优化,确定了制备工艺及工艺参数。由于本课题中选择的薄膜材料为  $H_4$  和  $MgF_2$ ,  $SiO_2$ , 因此在使用离子源时两种氧化物材料均需要充氧,真空度大约在  $1.0 \times 10^{-2}$  Pa 左右。离子源的各项参数设置为:加速电压 250 V,屏极电压 220 V,束流 40 mA 左右。蒸发前,对基底进行 10 min 的轰击,目的是清洁基片,提高凝聚系数,加强膜层的附着力。在膜层沉积的过程中,使用考夫曼离子源基于离子对沉积粒子的动量转换,提高沉积粒子的动能和沉积粒子的迁移率,增加聚集密度,改善结构完整性和应力匹配,从而提高了膜层的性能和使用时间。烘烤时,真空度设为  $3.0 \times 10^{-3}$  Pa,烘烤温度为 200 °C,离子束流 24 A。

采用晶控法控制几何厚度,要求材料折射率变化小,受制备工艺参数影响小<sup>[8]</sup>。另外,由于  $H_4$  材料当束流过大时会造成喷溅,因此在镀制过程中要充分预熔,  $H_4$  蒸发速率控制在 0.4 nm/s。  $MgF_2$  蒸发速率较快,为 0.8 nm/s,每次在关闭蒸发源挡板时,都会有部分残余  $MgF_2$  蒸镀到元件上,使厚度增加,所以应适当减薄  $MgF_2$  各层厚度,使实际沉积厚度接近理论厚度<sup>[9]</sup>。

## 4 膜层的测试结果分析

### 4.1 膜层测试结果及分析

根据三维腹腔镜的使用要求,采用日本岛津 UV-3150 分光光度计对薄膜的透射率与反射率进行了测试,得到的实验光谱曲线如图 5 所示。

由图 5 可以看出,420 nm 附近出现了一个很大的反射峰,可见光平均反射率在 0.6% 左右。利用软件模拟分析可知:(1)由于折射率的色散分布,使理论厚度与实际厚度有差异;(2)镀膜过程中随时间的增加,工艺参数也在变化,引起折射率的变化,从而导致厚度累积误差增大<sup>[10]</sup>。为了提高膜控精度,对工艺参数进行了修改。考虑沉积过程中,离子源和电子枪在工作中会产生很高

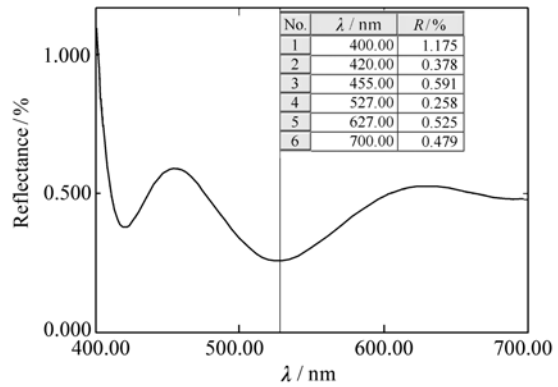


图 5 改进工艺前的实测反射率曲线

Fig. 5 Measured reflectance curve before improvement

的温度,使温度不均衡,所以在蒸发过程中适当降低了烘烤温度;另外,当  $MgF_2$  的厚度接近理论设计厚度时,适当降低  $MgF_2$  的速率到 0.5 nm/s,从而使厚度控制更精确<sup>[11]</sup>。改进工艺后的实测光谱曲线如图 6 所示。由图 6 可以看出,调整后反射率曲线比较平滑,400~700 nm 波段内的平均反射率 < 0.5%,且衬底几乎看不到颜色。

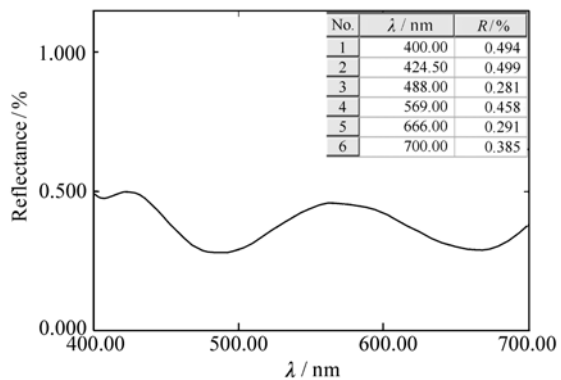


图 6 改进工艺后的实测反射率曲线

Fig. 6 Measured reflectance curve of after improvement

### 4.2 膜层性能测试

为了保证光学元件的可靠性,对样品进行了环境试验。由于腹腔镜在人体腹腔内工作,手术时需要浸泡在人体的血液中,人体血液呈弱碱性,正常值是  $7.4 \pm 0.05$ 。按照要求进行弱碱性测试,将镀制完成的原件放入配置好的弱碱性溶液中,48 h 后,观察表面元件无脱膜现象,基本满足三维腹腔镜的使用要求。

## 5 结 论

本文研制了三维腹腔镜用宽带增透膜。通过调整镀膜工艺参数和监控方法,减少膜厚控制误差,消除了可见透射区的反射峰并实现了衬底颜

色的平衡,提高了可见光的透射率,平滑了反射曲线,消除了衬底颜色,得到的薄膜满足医疗光学仪器的使用要求。但是实际测试的光谱曲线反射率高于理论设计的结果,如何降低可见区域的剩余反射率为今后研究的方向。

### 参考文献:

- [1] 虞啟琰,王娟萍.内窥镜设计制造中渐变折射率透镜的应用前景[J].中国医疗器械信息,1998,4(1):40-42.  
YU Q L,WANG J P. The application of GRN lens in endoscopes[J]. *China Academic J. Electronic Publishing House*, 1998,4(1):40-42. (in Chinese)
- [2] 唐晋发,顾培夫,刘旭,等.现代光学薄膜技术[M].杭州:浙江大学出版社,2006,10:61-94.  
TANG J F,GU P F,LIU X, *et al.*. *Modern Optical Thin Film Technology*[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006,10:61-94. (in Chinese)
- [3] 钟迪生.真空镀膜[M].沈阳:辽宁大学出版社,2001:181-189.  
ZHONG D SH. *Vacuum Coating*[M]. Shenyang:Liaoning University Press,2001:181-189. (in Chinese)
- [4] 韩军,孔英秀,尚小燕,等.膜料吸收系数对光学膜厚宽带监控的影响[J].光学技术,2005,31(5):672-678.  
HAN J,KONG Y X,SHANG X Y, *et al.*. Absorption coefficient of thin-film material affection optical coating wideband monitoring technology[J]. *Opt. Technique*,2005,31(5):672-678.
- [5] 王希权.可见光区高增透膜的理论计算[J].应用光学,2000,21(3):47-49.  
WANG X Q. Theoretical calculation of high anti-reflective film in visible spectrum region[J]. *J. Appl. Opt.*,2000,21(3):47-49. (in Chinese)
- [6] ZHANG CH,WANG Y T,LU W Q. Single-wavelength monitoring method for optical thin-film coating[J]. *Opt. Eng.*, 2004,43(6):1439-1452.
- [7] 谭宇,梁宏军,刘永强,等.用二氧化钛、二氧化硅和氟化镁膜料镀制0.4~1.1 μm超宽带增透膜[J].应用光学,2007,28(5):145-149.  
TAN Y,LIANG H J,LIU Y Q, *et al.*. 0.4 ~1.1 μm AR film prepared with TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> and MgF<sub>2</sub>[J]. *J. Appl. Opt.*, 2007,28(5):145-149. (in Chinese)
- [8] 贺才美,付秀华,张家斌,等.可见与红外双波段宽带增透膜的研制[J].光学学报,2009(10):83-85.  
HE C M,FU X H,ZHANG J B, *et al.*. Study and fabrication of visible and IR dual-band broadband antireflection coating [J]. *Acta Opt. Sinica*,2009(10):83-85.
- [9] 黄光伟,田维坚,卜江萍.超宽带增透膜新的设计法[J].光子学报,2007,36(9):324-327.  
HUANG G W,TIAN W J, *et al.*. New design of super wide bandwidth antireflection film[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007,36(9):324-327(in Chinese)
- [10] 缪毅强,毛书正,罗琦琨.宽带增透膜反射光谱的理论及实测偏差的修正[J].红外与毫米波学报,2001,20(6):225-227.  
MIAO Y Q,MAO SH ZH, *et al.*. Correction of deviation between theory and experiment for reflection spectrum of broadband anti-reflection coating[J]. *J. Infrared and Millimeter Waves*,2001,20(6):225-227. (in Chinese)
- [11] MACLEOD H A. *Thin-Film Optical Filters*[M]. Philadelphia:Institute of Physics,2001.

作者简介:魏孜洵(1985—),女,硕士研究生,主要从事现代光学制造技术方面的研究。E-mail:guder222@yahoo.com.cn  
付秀华(1963—),女,教授,主要从事光学薄膜及半导体激光器制造工艺等方面的研究。