

文章编号: 0253-2239(2005)05-701-6

## 脉宽压缩光栅用的多层膜设计和性能分析\*

孔伟金<sup>1,2</sup> 邵建达<sup>1</sup> 张伟丽<sup>1</sup> 方明<sup>1</sup> 范瑞瑛<sup>1</sup> 范正修<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)  
(<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100864)

**摘要:** 应用于啁啾脉冲放大技术中的脉宽压缩光栅是基于多层膜作为基底, 利用全息干涉技术和离子束技术蚀刻而成。脉宽压缩光栅的衍射效率和抗激光损伤阈值一方面依赖于光栅结构的设计, 另一方面很大程度上取决于作为基底的多层膜的设计。给出了以 413.1 nm 作为写入波长, 1053 nm 作为使用波长的多层介质光栅膜的设计, 样品在 ZZS-800F 型真空镀膜机上采用电子束蒸发方式沉积而成, 并给出了膜系结构对光学性能影响因素的详细分析, 结果表明膜系 H3L(H2L)<sup>9</sup>H0.5L2.03H 满足光栅膜的指标。给出了样品光学特性测试, 其使用波长处的透射率 < 0.5%, 写入波长处的透射率 > 90%, 测试表明样品满足设计要求且实验结果和理论设计符合得很好。

**关键词:** 薄膜光学; 膜系设计; 性能分析; 脉宽压缩

中图分类号: O484.1 文献标识码: A

## Design and Character Analysis of Multi-Layer Dielectric Film Used in Pulse Compressed Gratings

Kong Weijin<sup>1,2</sup> Shao Jianda<sup>1</sup> Zhang Weili<sup>1</sup> Fang Ming<sup>1</sup>  
Fan Ruiying<sup>1</sup> Fan Zhengxiu<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)  
(<sup>2</sup> Graduate School, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864)

**Abstract:** Pulse compressed gratings (PCG) used in chirped-pulse amplification system and based on multi-layer thin film stack are etched with ion-beam and holographic techniques. Diffraction efficiency and laser induced damage threshold are determined by the structure of the parameter of gratings, on the other hand, by the design of multi-layer dielectric greatly. A multi-layer dielectric stack design used at 1053 nm and exposed at 413.1 nm is given. The influence of the structure on the optical character is described in detail. The analysis shows that H3L(H2L)<sup>9</sup>H0.5L2.03H films meet the requirements of PCG. The sample was prepared by ZZS-800 vacuum machine with e-beam gun, and its optical character is given. Transmittance is less than 0.5% at using wavelength and above 90% at exposing wavelength. Results show that the optical property is excellent and there is a good agreement between the measured transmittance and the design.

**Key words:** thin film optics; film stack design; character analysis; pulse compression

### 1 引言

近年来随着激光技术的发展,超短、超快高能量激光器成为研究光和物质相互作用以及惯性约束核聚变等领域的有效手段。在典型的产生超短、超快高能量激光系统中,需要四次用到反射式光栅对光束进行压缩和放大。该系统要求脉宽压缩光栅必须同时

具有高的衍射效率和高的损伤阈值<sup>[1~3]</sup>。和镀金脉宽压缩光栅相比,全电介质脉宽压缩光栅由于具有高的衍射效率和高的损伤阈值,得到了迅猛发展和广泛应用。多层电介质膜系作为制备脉宽压缩光栅的载体,对光栅的性能有至关重要的影响。1995年,美国利弗莫尔(Livermore)实验室首次报道了利用 ZnS

\* 国家自然科学基金(10376040)和国家 863 计划资助课题。

作者简介: 孔伟金(1976~),男,山东泗水县人,中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,主要从事薄膜光学和偏光物理学的研究。E-mail: kwjzd@163.com

收稿日期: 2004-08-27; 收到修改稿日期: 2004-11-08

( $n=2.35$ )和  $\text{ThF}_4$  ( $n=1.52$ ) 交替镀制成多层反射膜系,顶层是  $\text{ZnS}$  作为刻蚀表面浮雕结构的载体<sup>[4]</sup>。同年, Li<sup>[5]</sup> 在表面浮雕光栅结构上沉积了 9 层  $\text{ZnS}/\text{Na}_3\text{AlF}_6$  材料以获得高的衍射效率,但是该设计的衍射效率与沉积多层膜系时光栅槽形结构保形好坏的程度有很大关系。1996 年, Britte<sup>[6]</sup> 首次提出了利用  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  来制备多层反射膜,指出顶层分别沉积  $\text{HfO}_2$  和  $\text{SiO}_2$  膜料时,为了获得相同的衍射效率,其厚度是不同的。1997 年 Livermore 实验室研究了  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  作为多层反射膜,  $\text{HfO}_2$  为顶层的脉宽压缩光栅用多层膜系的设计,其基本的膜系结构为  $(\text{H}2\text{L})^7$ ,但是该设计没有考虑到顶层的浮雕结构的厚度给膜系性能带来的变化<sup>[7]</sup>。1999 年, Karl Hehl 和 Bischof 给出了以  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  作为多层反射膜,应用于  $532\text{ nm}$ ,  $45^\circ$  角入射, TE 波模式下的多层反射膜的设计,但是该设计参量并不是常规的啁啾脉宽放大系统中的参量,其参量的设计只是为了测试的方便<sup>[8]</sup>。

在光学薄膜材料中,氧化铪( $\text{HfO}_2$ )是一种常见的薄膜材料,它具有从紫外(UV)到红外(IR)较宽的透明区域( $0.22\sim 12\ \mu\text{m}$ ),易于蒸发;同时还具有高的折射系数和较高的抗激光损伤阈值<sup>[9~11]</sup>。当前,对全电介质脉宽压缩光栅的研究中,  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  膜料的组合成为设计和制备脉宽压缩光栅用多层电介质膜系的主流。

本文以  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  作为高、低折射率膜料组合,给出了以  $413.1\text{ nm}$  作为写入波长,  $1053\text{ nm}$  作为使用波长的多层介质光栅膜的设计;并对膜系结构对光学性能的影响给出了详细的分析。结果表明膜系  $\text{H}3\text{L}(\text{H}2\text{L})^9\text{H}0.5\text{L}2.03\text{H}$  不仅满足光栅膜的设计要求,而且易于利用电子枪作为蒸发源来制备。样品测试结果表明:实验结果达到设计指标且和理论符合得很好。

## 2 全电介质光栅膜的设计指标

多层介质膜光栅是由基底、高反射率介质膜系和周期性浮雕结构构成,其基本结构如图 1 所示。样品的制备过程分为两步:一是反射膜(由  $\text{HfO}_2$  和  $\text{SiO}_2$  交替沉积而成)和顶层膜( $\text{HfO}_2$ )的制备;二是在顶层  $\text{HfO}_2$  膜上对光刻胶进行全息干涉曝光、显影,然后利用离子束刻蚀将浮雕结构转移到顶层  $\text{HfO}_2$  膜中去。而全电介质光栅膜是指在基片上沉积的多层反射膜系和其上用于刻蚀光栅的顶层

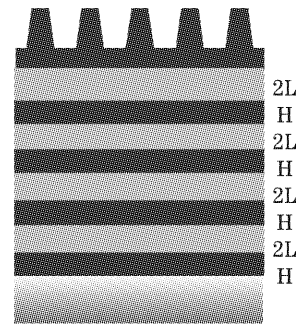


图 1 光栅结构

Fig. 1 The structure of the gratings

$\text{HfO}_2$ 。介质膜光栅膜系追求高的反射率和高损伤阈值,同时考虑到全息曝光处所使用的波长,光栅膜系要满足以下几个方面的要求:

1)  $1053\text{ nm}$  处,  $51.2^\circ$  (S 光) 入射膜系的透过率小于  $0.5\%$ 。

2)  $413.1\text{ nm}$  处,  $17.8^\circ$  (S 光) 入射膜系的透射率大于  $90\%$ ,以减小全息干涉曝光时反射光形成的干涉的干扰。

3) 通过调整膜系结构,使电场强度的分布尽可能远离膜层和空气的交界面以提高膜系的损伤阈值。

在全息干涉中,考虑到  $413.1\text{ nm}$  激光在光刻胶内的传播,设计的膜系结构还要满足以下两点:

1) 在涂布光刻胶后,进入到光刻胶和膜层的交界面上光的反射率要足够低(透射率足够高)。

2) 入射到光刻胶表面的光的反射率(透射率)随光刻胶的厚度变化要不敏感。

## 3 光栅膜设计和性能分析

### 3.1 基础膜系设计

根据薄膜光学干涉原理可知,  $(\text{HL})^n$  膜系的基本周期的膜层厚度为  $\sum nd = \lambda_0/2$ ,可能出现的反射带的中心波长满足条件:

$$\lambda_0/\lambda = q. \quad q = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

采用  $(\text{HL})^n$  基础膜系可以很容易在使用波长  $1200\text{ nm}$  (使用波长处  $51.2^\circ$  入射) 处实现接近  $100\%$  的高反射。如果在  $1200\text{ nm}$  处实现一级次高反,在二级次  $600\text{ nm}$  为高透射区,在三级次  $400\text{ nm}$  处为高反射区,该高反射区(具有一定的高反射带宽)对  $413.1\text{ nm}$  处要求高透不相符。

根据膜系的设计要求,必须使膜系在  $1053\text{ nm}$  处相位厚度为  $\lambda_0/2$  的整数倍,而在  $413.1\text{ nm}$  处附近要抑制反射。采用  $(\text{H}2\text{L})^n$  的基础膜系设计。该基

基础膜的膜层厚度为  $\sum nd = 3\lambda_0/4$ , 在中心波长  $\lambda_0$  处不会出现高反射区, 只有在那些膜层厚度为  $\lambda_0/2$  整数倍的波长处才会出现反射带。根据干涉原理, 波长为  $\lambda$  处的相位为

$$\delta = (2\pi/\lambda) \times (3\lambda_0/4) = m\pi, \quad (2)$$

$$m = 1, 2, 3, \dots$$

可能出现反射带的波长处为:  $\lambda_0/\lambda = q = 2m/3$  ( $q = 2/3, 4/3, 6/3, 8/3, \dots$ ), 脉宽压缩光栅用多层膜系要求在 1053 nm 处实现一级次高反射区, 即  $3\lambda_0/2 = 1200$  nm (使用波长在  $51.2^\circ$  入射时为 1053 nm, 而在写入波长处入射角为  $17.8^\circ$ , 该角度下的一级次反射带出现在 1170 nm 处), 可以得到设计时的中心波长  $\lambda_0 = 780$  nm, 则第二级次的反射区出现在  $3\lambda_0/4 = 585$  nm 波长处, 而第三级次为透射区, 波长为  $3\lambda_0/6 = 390$  nm, 该透射区的带宽为 20 nm 左右, 可以提高 413.1 nm 写入波长处的透射率。

### 3.2 多层光栅膜系的修正设计

用于脉宽压缩光栅的多层电介质膜系的设计的基础膜系是  $(H2L)^n$ , 但是为了优化膜系制备工艺, 进一步提高写入波长的透过率, 需要对基础膜系进行进一步的优化设计。

1) 写入波长 413.1 nm 处的高透射区比较窄, 很容易使透射的峰值落在低谷, 为此, 在基础膜系的后面加入 H0.5L 的修正层, 可以使写入波长的性能得到修正。修正前后在 413.1 nm 附近的透射光谱特性如图 2 所示。

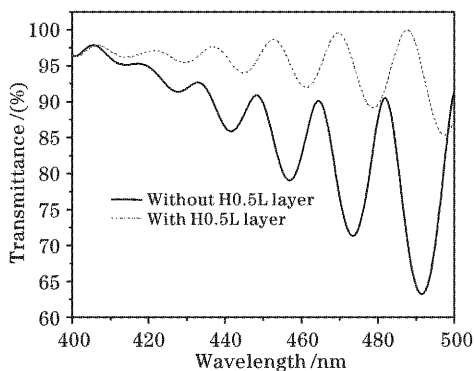


图 2 修正前后透射光谱特性

Fig. 2 Transmittance character with and without H0.5L

2) 根据对衍射效率影响因素的分析, 其顶层的厚度取 205 nm。不论是对获取高衍射效率, 还是对膜系制备、全息曝光和表面浮雕结构的离子束刻蚀等工艺都是合适的, 其厚度取为  $2.03H$  ( $H$  为  $HfO_2$  的厚度)。

基于以上对膜系的设计要求和实际制备工艺,

最终设计的膜系为  $H3L(H2L)^9 H0.5L2.03H$ , 设计波长为 800 nm。

### 3.3 多层光栅膜系的厚度误差分析

膜系的厚度控制采用透射光控方式, 每层为标准的  $\lambda/4$  厚度。光控制备过程中根据光学信号的变化来判断厚度变化, 采用极值法选择停止点。但是这样也引入了厚度的制备误差, 这个误差对高折射率材料而言偏厚, 对低折射率而言偏薄。为此对整个膜系赋予 5% 的厚度误差, 附有厚度误差的实际制备膜系模拟为

$1.05H2.94L(1.05H1.96L)^9 1.05H0.49L2.07H$ , 其性能如图 3 所示。可以看出, 膜系厚度控制引入 5% 的误差后, 在 400 nm 附近形成三半波孔。理论设计不存在这一低反射带, 因此在膜系沉积时一方面是要精确控制每层的厚度以减小三半波孔的产生, 另一方面要注意工艺的稳定性 and 可重复性。

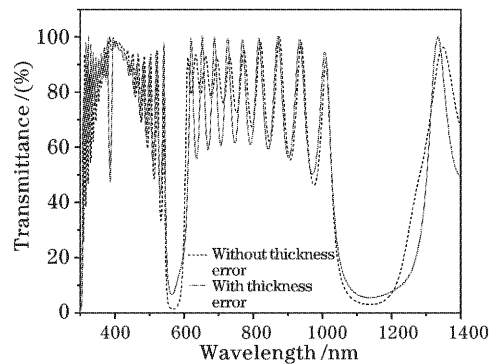


图 3 理论设计与附有厚度误差模拟的比较

Fig. 3 The comparison between theoretical design and thickness error simulation

## 4 膜系光学特性分析和计算

### 4.1 顶层 $HfO_2$ 厚度及涂布光刻胶厚度对写入波长处透射特性的影响

由于使用波长处带宽比较宽, 顶层  $HfO_2$  厚度及涂布光刻胶厚度变化对使用波长 (1053 nm) 处的透射率没有影响, 但是在写入波长 (413.1 nm) 处其透射率对顶层  $HfO_2$  厚度的变化比较敏感。顶层  $HfO_2$  厚度的变化以及光刻胶的变化都会引起写入波长透射率的变化, 这种变化的分析对于膜系制备、布胶和显影以及容差分析等都具有指导意义。

图 4 中给出了顶层  $HfO_2$  厚度在 180~220 nm 范围内变化时写入波长处透射率的变化关系 (413.1 nm 激光以  $17.8^\circ$ , TE 波模式入射)。从图中看出: 当顶层的厚度在 200~220 nm 的范围内变化

时,其透射率均大于93.2%,而在210 nm处达到最大值95.2%;图5给出了在写入波长413.1 nm处光的透射特性随涂布的光刻胶厚度的变化关系(顶层HfO<sub>2</sub>厚度设定为205 nm)。从图5中可知,当顶层的光刻胶厚度在340~400 nm范围内变化时,整个系统的透射率均大于92.79%,在367 nm达到最大的透射率95.58%,且透射率的最大值和最小值相差仅仅为2.79%。这对于膜系制备、布胶和显影提供了很大的工艺宽容度。

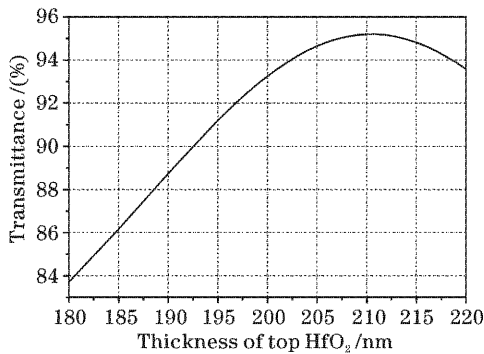


图4 顶层厚度与413.1 nm处折射率关系

Fig. 4 The relationship between transmittance and the thickness of top HfO<sub>2</sub> layer at 413.1 nm

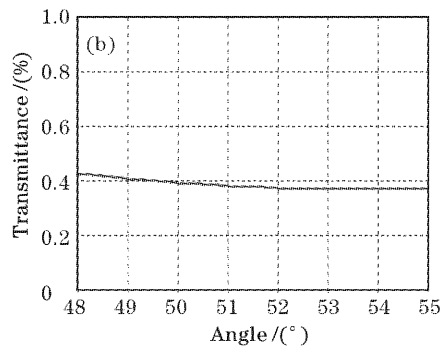
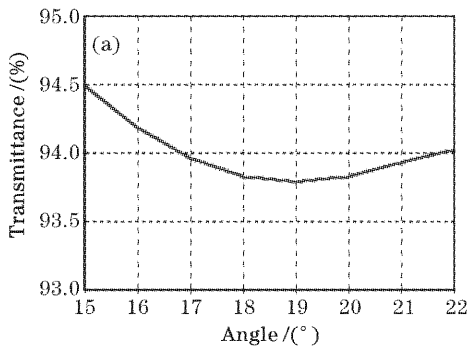


图6 透射率随入射角变化曲线。(a) 413.1 nm处,(b) 1053 nm处

Fig. 6 The angle spectrum curve of the stack at the wavelength of (a) 413.1 nm, (b) 1053 nm

### 4.3 膜系在使用波长和写入波长处的电场分布的计算

脉宽压缩光栅主要应用于产生超短、超峰值功率的啁啾脉冲放大系统中,该系统对光栅的损伤阈值要求比较高。作为脉宽压缩光栅表面浮雕结构载体的多层电介质膜首先应该具有较高的损伤阈。光入射到多层电介质膜系中形成驻波场分布,驻波场的极大值应该远离多层膜和空气的界面以提高损伤阈值。膜系 H3L(H2L)<sup>9</sup>H0.5L2.03H 在使用波长1053 nm,入射角为51.2°时其驻波场分布如图7(a)所示,可以

看出,电场强度的分布远离薄膜和空气的界面,符合设计要求。

在写入波长处主要是利用双光束干涉的原理来对光刻胶进行曝光,从而在光刻胶上形成全息干涉条纹,经适当时间的显影在光刻胶上形成表面浮雕结构。因此在写入波长处一是要求光的反射率要低,以免过多的反射影响全息干涉曝光条纹的对比度;二是反射的两光束驻波场不要形成驻波干涉,否则对全息干涉曝光形成的干涉条纹的形状产生影响,进而显影后形成凹凸形的槽形结构。从图7(b)

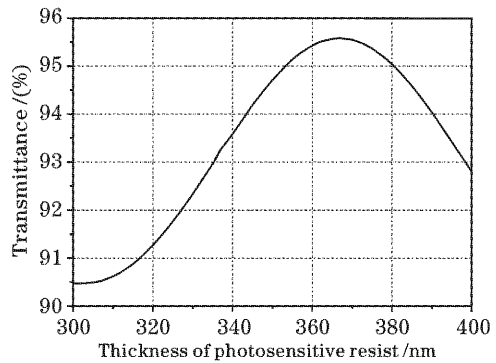


图5 光刻胶厚度与413.1 nm处透射特性关系

Fig. 5 The relationship between transmittance and the thickness of photosensitive resist

### 4.2 膜系在使用波长和写入波长处附近的角谱计算

脉宽压缩光栅的使用波长和写入波长的入射角度分别为51.2°和17.8°,当入射角有较小改动时希望膜系的整体光学性能比较稳定;入射角微小改变膜系的性能稳定,也说明了膜系在制备过程中的工艺比较稳定。图6给出了膜系在使用波长和写入波长附近透射率随入射角度的变化关系。从图6中可以看出,不论是在使用波长和写入波长,入射角有±2°的变化均满足脉宽压缩光栅用光学薄膜的设计指标,这为膜系的制备工艺提供了一定的宽容度。

看出,电场强度的最大值远离膜层而分布在空气内,而在膜层内的电场强度比较小且分布均匀,这样在

膜层内电场的调制作用比较小。

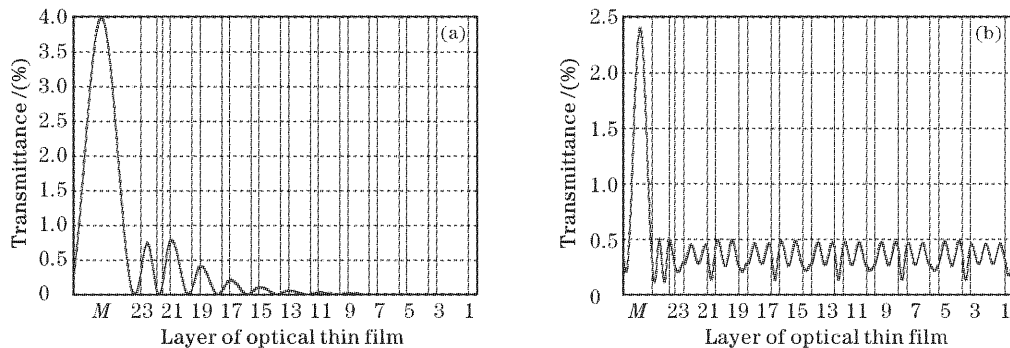


图 7 电场分布。(a)入射角  $51.2^\circ$ ,  $1053\text{ nm}$  处,(b)入射角  $17.8^\circ$ ,  $413.1\text{ nm}$  处

Fig. 7 The distribution of electric field. Incident with (a)  $51.2^\circ$  at  $1053\text{ nm}$ , (b)  $17.8^\circ$  at  $413.1\text{ nm}$

## 5 膜系的制备和测试

### 5.1 样品的制备

$\text{SiO}_2$  膜料光学特性优良,蒸发特性稳定; $\text{HfO}_2$  膜料抗激光损伤阈值高。选用这两种膜料作为高低介质折射率。在 ZZS-800 F 真空镀膜机上采用电子枪热蒸发方式制备了该膜系。厚度的控制采用极值法,第一个控制片用来控制  $\text{H}3\text{L}(\text{H}2\text{L})^9\text{H}0.5\text{L}$  反射板,第二个控制片用来控制  $2.01\text{H}$  的顶层厚度。膜系制备的工艺参量如表 1 所示。

表 1 工艺参量

Table 1 The parameter of deposition

Base vacuum	$2.6 \times 10^{-3}\text{ Pa}$	$\text{O}_2$ pressure	$8 \times 10^{-3}\text{ Pa}$
Temperature	$300\text{ }^\circ\text{C}$	$\text{SiO}_2$	50 mA
Baking	3 h	$\text{HfO}_2$	110 mA
Gas	$\text{O}_2$		

### 5.2 透射光谱的性能测试

样品透射图谱的测试使用 Lamab900 分光光度计,该设备对透射率的测量精度为  $\pm 0.05\%$ 。图 8(a)和图 8(b)分别为入射角  $51.2^\circ$  和  $17.8^\circ$ ,TE 偏振光入射的理论设计和测试得到的透射光谱。

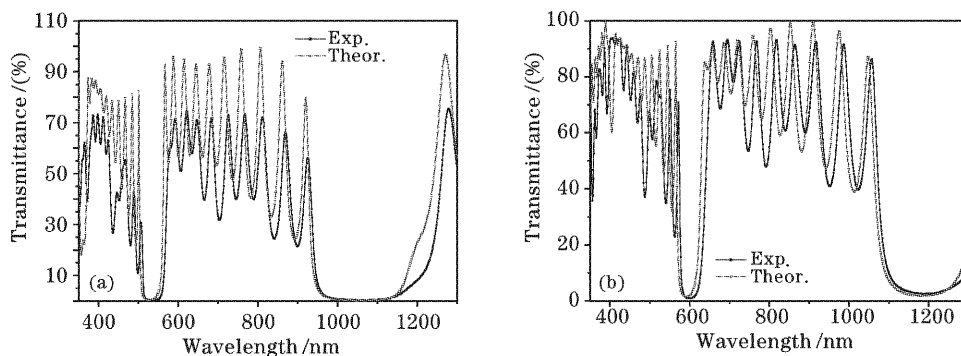


图 8 膜系  $\text{H}3\text{L}(\text{H}2\text{L})^9\text{H}0.5\text{L}2.03\text{H}$  的理论设计和实验测试透射谱的比较

Fig. 8 The comparison of theory and experimental optical character of  $\text{H}3\text{L}(\text{H}2\text{L})^9\text{H}0.5\text{L}2.03\text{H}$

从图 8 可以看出,理论和实验的光谱特性符合得很好。在局部区域透射率存在一定的差别,这种差别来源于材料本身的蒸发特性。在  $1053\text{ nm}$  和  $413.1\text{ nm}$  处测得透射率分别为  $0.29\%$  和  $91.33\%$ ,在  $1053\text{ nm}$  附近  $70\text{ nm}$  的宽度范围内透射率均低于  $0.5\%$ ,在  $413.1\text{ nm}$  附近的  $20\text{ nm}$  宽度范围内,透射比均优于  $90\%$ 。这给光栅的使用和全息曝光提供

了较大的容许范围。

## 6 结 论

对应用于脉宽压缩光栅的多层电介质膜系结构和光学性能进行了详尽的分析:给出了基础膜系  $(\text{H}2\text{L})^n$  抑制三级次反射的干涉原理;直接在控制片上沉积  $\text{H}3\text{L}$  层来扩大走值范围以提高控制精度;

在基础膜系后附加 H0.5L 修正层来提高写入波长处的透射比。计算了膜层厚度控制 5% 的误差对写入波长的透射率的影响,分析了顶层  $\text{HfO}_2$  厚度在 280~220 nm 范围内变化、光刻胶在 300~400 nm 范围内变化时对写入波长透射率的影响,同时计算了使用波长(1053 nm)和写入波长(413.1 nm)处的角谱特性和驻波场分布。最后给出了利用 ZZS-800F 真空镀膜机制备的样品测试结果,结果表明实验结果和理论设计的光学特性符合得很好。

**致谢** 感谢清华大学李立峰教授和苏州大学吴建宏教授所给予的膜系性能分析方面的有益的探讨。

### 参 考 文 献

- 1 Li Chuandong, Zhang Zhengquan, Xu Zhizhan. Width limitation of compressed pulse in chirped-pulse amplification [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(8): 1077~1081 (in Chinese)  
李传东,张正泉,徐至展. 啁啾脉冲放大中的脉宽限制[J]. 光学学报, 1996, **16**(8): 1077~1081
- 2 Yang Jianjun, Sun Yanling, Ruan Shuangchen *et al.*. Study on single-grating stretcher in chirped-pulse amplification [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(4): 457~461 (in Chinese)  
杨建军,孙艳玲,阮双琛等. 啁啾脉冲放大系统中光栅展宽器的性能与实验研究[J]. 光学学报, 1998, **18**(4): 457~461
- 3 C. P. Hauri, P. Schlup, G. Arisholm *et al.*. Phase-preserving chirped-pulse optical parametric amplification to 17.3 fs directly from a Ti:sapphire oscillator[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(12): 1369~1371
- 4 M. D. Perry, R. D. Boyd, J. A. Britten *et al.*. High-efficiency multi-layer dielectric diffraction gratings[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(8): 940~941
- 5 Lifeng Li, Jeffrey Hirsh. All-dielectric high-efficiency reflection gratings made with multi-layer thin-film coatings [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(11): 1349~1351
- 6 J. A. Britten, M. D. Perry, B. W. Shore *et al.*. High-efficiency, dielectric multi-layer gratings optimized for manufacturability and laser damage threshold[C]. *Proc. SPIE*, 1996, **2714**: 511~520
- 7 B. W. Shore, M. D. Perry, J. A. Britten *et al.*. Design of high-efficiency dielectric reflection gratings [J]. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1997, **14**(5): 1124~1135
- 8 Karl Hehl, Joerg Bischoff, Ullrich Mohaupt *et al.*. High-efficiency dielectric reflection gratings: design, fabrication, and analysis[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(30): 6257~6271
- 9 Jeunifer D. Traylor Kruschwitz, Walter T. Pawlewicz. Optical and durability properties of infrared transmitting thin films[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(10): 2157~2159
- 10 Yuan Jingmei, Tang Zhaosheng, Qi Hongji *et al.*. Analysis of optical property for several ultraviolet thin film materials [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(8): 984~988 (in Chinese)  
袁景梅,汤兆胜,齐红基等. 几种紫外薄膜材料的光学常数和性能分析[J]. 光学学报, 2003, **23**(8): 984~988
- 11 Yuan Jingmei, Tang Zhaosheng, Yi Kui *et al.*. Effect of absorption character to the reflection of 193 nm  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  multilayer thin films [J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(12): 1469~1472 (in Chinese)  
袁景梅,汤兆胜,易葵等. 高折射率材料吸收特性对 193 nm  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  多层膜反射特性的影响 [J]. 中国激光, 2004, **31**(12): 1469~1472