

倍频激光薄膜——1.06 微米高透 与 0.53 微米高反膜

李 庆 国

(中国科学院上海光机所)

提要: 在 $\lambda/4$ 多层膜上增加一层附加层, 获得了 1.06 微米波长高透和 0.53 微米波长高反, 其主要结果: 1.06 微米, $T > 99.3\%$; 0.53 微米, $R > 99.6\%$ 。

Laser thin film for frequency doubling—high transmissivity at 1.06 μm and high reflectivity at 0.53 μm

Li Qingguo

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Abstract. High transmissivity at 1.06 μm and high reflectivity at 0.53 μm are obtained by coating a supplementary layer on the $\lambda/4$ stack. The primary results are $T > 99.3\%$ at 1.06 μm and $R > 99.6\%$ at 0.53 μm .

随着激光倍频技术的发展, 对反射膜的要求也提高了, 它要求对基频和倍频光都有一定的光谱特性。

1.06 微米高透与 0.53 微米高反膜, 在倍频技术中应用比较广泛。虽然有关这类薄膜的报导较多, 但据我们粗略的分析认为, 大部分文章都是以长波通(LWF)作为基础, 而后修正通带的光谱性能。显然, 这在制备工艺上较麻烦, 而且 1.06 微米波长的透过率起伏也较大。

我们在本文介绍一种较简便的方法, 即在 $\frac{\lambda}{4}$ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 多层膜上增加一层附加层, 达到了 1.06 微米高透的透过率 $T > 99.3\%$,

而对 0.53 微米的反射率很高, $R > 99.6\%$ 。

计 算

四分之一周期膜系有一个重要特点: 反射相位是变化的^[1]。在截止带的两侧, 相位随着波长不同而变化。因此, 通带的光谱曲线是波动的, 1.06 微米波长正位于通带上。计算结果表明: 如果在多层膜的外侧, 即在空气与多层膜之间增加一层或几层适当薄膜, 会大大改善 1.06 微米波长的光谱透射性能, 而对截止带中心反射率的影响不大。于是, 我们在 $\lambda/4$ 多层膜的外侧增加一层适当

收稿日期: 1982 年 11 月 22 日。

的薄膜, 作为附加层, 从而达到 1.06 微米波长高透且 0.53 微米波长高反射之目的。该附加层应如何求得呢? 通常可采用薄膜设计的一般方法去寻找, 这里我们采用一组简便的公式, 无需作很多计算便能找到附加层的最佳条件——折射率 n_F 和相位厚度 δ_F 。

$\frac{\lambda}{4}$ 多层膜系的特征矩阵为:

$$\begin{pmatrix} M_{11} & iM_{12} \\ iM_{21} & M_{22} \end{pmatrix}。$$

一层附加层的特征矩阵为:

$$\begin{pmatrix} m_{11} & im_{12} \\ im_{21} & m_{22} \end{pmatrix}。$$

根据在垂直入射下特定波长得到零反射的条件^[2], 经过推导, 得到下面一组公式。

$$n_F^2 = \frac{n_s M_{22} (M_{11} - n_s M_{22}) - M_{21} (M_{21} - n_s M_{12})}{M_{11} (M_{11} - n_s M_{22}) - n_s M_{12} (M_{21} - n_s M_{12})} \quad (1)$$

$$\tan \delta_F = \frac{n_F (n_s M_{12} - M_{21})}{n_F^2 M_{11} - n_s M_{22}} \quad (2)$$

式中: n_s 为基底玻璃的折射率; n_F 、 δ_F 分别为附加层的折射率和相位厚度。

对于主膜系是 $\frac{\lambda}{4}$ 多层膜, 如果它的内层膜(与基底相接)和外层膜(与附加层相接)都是高折射率层(H), 附加一层后, 截止带中心的透过率可用公式(3)近似计算:

$$T = \frac{2T_0}{\left\{ \frac{2(m_{22}^2 + m_{12}^2) + (m_{11}m_{22} + m_{12}m_{21})T_0}{T_0} \right\}} \quad (3)$$

式中: T_0 是 $\frac{\lambda}{4}$ 多层膜的透过率。

下面就 ZrO_2/SiO_2 膜系的倍频膜进行一些计算和讨论。

以 21 层 ZrO_2/SiO_2 膜为例, 附加一层 SiO_2 膜后, 用公式(3)计算表明, 截止带中心(0.53 微米)反射率只降低 0.09%。可见, 只要层数选择适当, 附加层的介入对其高反射的影响不甚严重, 所以, 我们不列为重点考虑。

在 22 层 ZrO_2/SiO_2 膜的外侧增加一层附加层, 1.06 微米波长的剩余反射与附加层

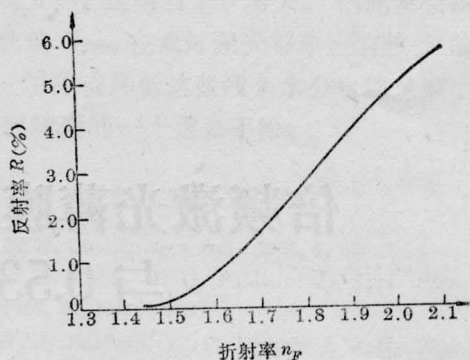


图 1 附加层折射率与剩余反射(1.06 微米)的关系

$ZrO_2-n_H=1.9$; $SiO_2-n_L=1.46$;
 $K_9-n_s=1.51$

的折射率之间的关系如图 1 所示。

计算表明主膜系的层数不同, 对于附加层的要求也不相同。表 1 列出 ZrO_2/SiO_2 多层膜的最佳附加层条件。

从以上的计算看出, 对于附加层的最佳条件往往难于达到, 但是, 从图 1 结果得知, 在最佳值附近选择, 再经实际制备时的修正, 也可以取得比较满意的结果。在我们的实验工作中也证实了这个事实。

附加层薄膜多使用低折射率薄膜, SiO_2 膜是比较理想的一种, 此外, 也可以用 Al_2O_3 膜和 MgF_2 膜等。

表 1 ZrO_2/SiO_2 多层膜的附加层

层数	附加层折射率 (n_F)	附加层光学厚度 (\AA)
21	1.43	3084
22	1.43	1822
23	1.21	3048
24	1.27	3914
25	1.87	3684

注: $ZrO_2-n_H=1.9$; $SiO_2-n_L=1.46$; $K_9-n_s=1.51$

实 验

本实验工作是在 DMD-450 型镀膜机上

进行的。采用直射式电子枪蒸涂高熔点氧化物。

用极值法控制膜层的光学厚度。

(1) ZrO_2/SiO_2 膜系 $G(HL)^{K_nFA}$

ZrO_2 膜的光学性质与力学性质是不稳定的,受工艺的影响极大。因此,要严格掌握以下工艺条件。

基底温度 140~145°C,

淀积率 600 Å/分

不充 O_2 淀积,真空度保持在 1.2×10^{-4} 托。

(2) TiO_2/SiO_2 膜系 $G(HL)^{K_nFA}$

TiO_2 在真空蒸发时要分解,生成低氧态化合物,使薄膜的光损耗增大。因此,要充 O_2 淀积。

基底温度 200°C

淀积率 4500 Å/分

充 O_2 淀积,充 O_2 压保持在 1.4×10^{-4} 托。

(3) 实验结果

我们用 ZrO_2/SiO_2 、 TiO_2/SiO_2 两种多层膜系制备了倍频激光膜。表 2 所列的是部分结果,这里均没有除掉基底背面的反射影响。从表中结果看,1.06 微米的透过率都较高, $T \geq 95.5\%$, 单面的剩余反射率在 0.4~0.85% 之间。0.53 微米的反射率也比较高, TiO_2/SiO_2 膜系高达 99.85%。样品玻璃基底的背面影响,可以在背面镀上相应的增透

表 2 倍频激光膜的测试结果

编号	主膜系	附加层	附加层		0.53 微米 R(%)	1.06 微米 T(%)
			光学厚度(Å)			
			计算值	实验值		
10-20-A	ZrO_2/SiO_2	SiO_2	1809	1730	99.39	>95.5
10-21-A	ZrO_2/SiO_2	SiO_2	1809	1830	99.34	95.5
10-28	TiO_2/SiO_2	Al_2O_3	1466	1400	99.85	95.5
11-11	TiO_2/SiO_2	Al_2O_3	1466	1410	99.64	95.5
11-18	TiO_2/SiO_2	Al_2O_3	3038	2800	99.72	95.5

注: 样品背面均无增透膜

表 3 倍频激光膜 1.06 微米的透过率

编号	1.06 微米 T(%)	
	背面无增透膜	背面有增透膜
10-21	95.5	99.8
10-23	>95	>99.3
11-6	95.5	>99.6
11-18	95.5	99.6
11-12	95.5	99.3

膜来消除,结果列于表 3。

从所测得的光谱曲线看,在 1.06 微米附近曲线比较平,这对于实验的重复性大有好处,如图 2 所示。在图中曲线 1 表示没有涂膜的 K_9 玻璃的光谱曲线;曲线 2 表示 TiO_2/SiO_2 (18 层)用 Al_2O_3 膜作为附加层的光谱曲线;曲线 3 表示 ZrO_2/SiO_2 (22 层)用 SiO_2 膜作为附加层的光谱曲线;曲线 4 表示长波通膜系的光谱曲线;曲线 5 表示曲线 2 的样品在其玻璃背面镀有增透膜时的光谱曲线。前四种样品的基底背面均无增透膜。

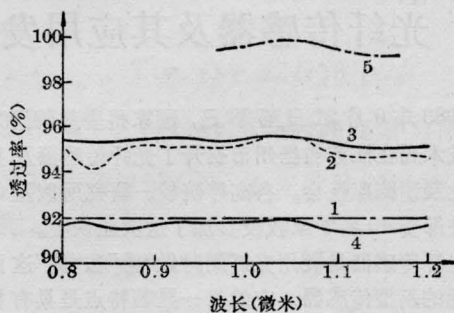


图 2 倍频激光膜的光谱曲线

1— K_9 玻璃; 2— $TiO_2/SiO_2+Al_2O_3(1700\text{Å})$;
3— $ZrO_2/SiO_2+SiO_2(1822\text{Å})$; 4— ZrO_2/SiO_2
 $(\frac{H}{2}L\frac{H}{2})^k$; 5—在曲线 2 的样品背面镀
有增透膜

讨 论

用本方法制备的 1.06 微米增透与 0.53 微米全反膜,不仅能达到较高的指标,而且有很好的重复性。我们连续涂制十次所得样品 1.06 微米透过率均在 95~95.5% 之间(背面

没有涂增透膜), 单面剩余反射率 0.4~0.85%。

实验结果能较好地与计算值相符合, 不过, 在计算时要注意实验得到的折射率与理论值之间的差异。最好是把实际淀积的折射率值引入到计算中来。比如, ZrO_2 膜, 我们取三个值, 分别代入有关层中计算, 效果很好。

由于主膜系是采用了四分之一波长厚的规整膜系, 所以, 制备工艺简便, 只要主膜涂制稳定, 不难得到满意的结果。附加层的光学厚度是非 $\frac{\lambda}{4}$ 厚, 但它是淀积在主膜系的最后面, 经过实验就能找到合适的条件。

为了提高该膜的光学性质, 我们特别注意二次电子对薄膜的损伤, 使用直射式电子枪尤为重要。

我们知道, 当电子枪的电子束打到蒸发材料上时, 会产生二次电子。二次电子的强弱跟电子束能量的大小、被蒸材料的种类及电子枪结构好坏有直接关系。由于二次电子的作用, 膜面粗糙, 有时会出现损伤环, 光损耗增大, 反射率大大降低。

我们在本次工作中, 设置了二次电子吸收板, 同时改变焦斑的位置, 使基底处的二次电子密度减小 3 倍, 从而提高了 0.53 微米的反射率 0.4% 以上。

最后, 向帮助测试样品的陆月妹、何朝玲、乔玉令同志致以感谢。

参 考 文 献

- [1] 周九林, 尹树百译;《光学薄膜技术》, 1974 年。
- [2] J. Mouchat; *Appl. Opt.*, 1977, 16, No. 12, 3237.

光纤传感器及其应用发展预测座谈会在扬州市召开

1983 年 9 月 21 日至 28 日, 国家科委基础研究与新技术局在江苏省扬州市召开了光纤传感器及其应用发展预测座谈会。各高等院校、研究所以及中央有关部委 40 名专家教授参加了这次座谈会。

光纤传感器是利用光纤同时做“感”和“传”这两种功能的新型传感器, 它的第一显著特点是具有极高的探测传感灵敏度。比如用于测量磁场强度的光纤磁场传感器, 在室温条件下现在已经可以检测强度弱到 10^{-9} 高斯, 理论估计还可以测量弱到 10^{-13} 高斯, 而传统的传感器, 在室温条件下最低只能测出 10^{-6} 高斯; 又如测量水声的光纤声压传感器, 其检测灵敏度就已经超过常规水声探测器中性能最优的压

电水听器 H_{56} 。

光纤传感器第二个特点是不受电磁场干扰, 不会产生电火花。因此在有强的电磁场干扰, 或者存在易燃易爆气体等恶劣环境中, 这类传感器也能够可靠地工作, 在电力工业、石油化工以及国防军事上, 具有特殊的应用前景。

参加会议的学者在介绍交流国内外光纤传感技术研究、发展和应用情况的基础上, 认真讨论分析了我国发展这项技术的问题, 并提出了“关于我国发展光纤传感技术的建议”, 会议还决定在明年召开一次技术方案讨论会。

(纪钟)