

文章编号: 1009-444X(2006)01-0049-05

多层反膜系反射特性的计算机模拟计算及其应用

王 珊

(上海工程技术大学 基础教学学院, 上海 201620)

摘要: 根据薄膜光学与膜系设计的原理, 对非四分之一波长的多层反射膜系的反射特性进行了计算, 总结出高折射率薄膜的光学厚度与膜系的倍频反射带之间的关系, 并以此指导设计出特殊要求的多层反射膜系。

关键词: 膜系设计; 多层反射膜; 反射率

中图分类号: O 484.1 **文献标志码:** A

Computer Calculation and Application of Anti-reflective Multi-Layer Coatings' Optical Performance

WANG Shan

(College of Fundamental Studies, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: The optical performance of AR multi-layer coatings with non-quarter wavelength thickness was calculated by the theory of optical thin films. Reflectance characteristics with the changing of optical thickness of high refractive index layers were found and applied to the design of special AR multi-layer coatings.

Key words: coating-design; anti-reflective multi-layer coatings; reflectance

多层膜系无论是在军工还是民用领域都有着很广泛的应用, 例如作为高标准光学元件表面镀制的增透膜、反射膜和保护膜; 光纤通讯中的平面波导膜、各种玻璃陶瓷材料表面的发光涂膜和着色膜等等。本文针对高标准光学元件表面镀制的多层介质反射膜系^[1]进行研究。利用理论计算与计算机模拟, 对非四分之一波长的多层反射膜系的反射特性进行计算, 总结出高折射率膜层的光学厚度与膜系的倍频反射带之间的关系, 并以此设计出在基频和二倍频高反而在三倍频增透的多层介质反射膜系。

1 薄膜光学与膜系设计的理论基础^[2]

经典的多层高反膜是由高、低介电常数的两种膜周期排列组成, 每层膜的光学厚度都为 $\lambda_0/4$, 其中 λ_0 为入射光的中心波长。实验室制备的多层高反膜通常可用下列符号表示:

$$\text{GHLHLH} \cdots \text{LHA} = \text{G(HL)}^N \text{HA}$$
$$N = 1, 2, 3 \cdots$$

收稿日期: 2005-12-01

基金项目: 上海市高校选拔培养优秀青年教师科研专项基金资助项目(05XPQ30)

作者简介: 王 珊(1979-), 女, 四川成都人, 硕士, 研究方向为光学薄膜设计、纳米材料化学合成。

其中, G 和 A 分别代表基底(玻璃)和空气; H 和 L 分别代表高低折射率的膜层; N 表示膜系的周期。

在理论设计时, 介质膜层的吸收可忽略不计。在折射率为 n_g 的基片上镀以光学厚度为 $\lambda_0/4$ 的高折射率(n_1)的膜层后, 由于空气-膜层和膜层-基片界面的反射光同位相, 使反射率大大增加。对于中心波长 λ_0 单层膜和基片组合的导纳为 n_1^2/n_g 。

垂直入射的反射率为

$$R = \left[\frac{n_0 - n_1^2/n_g}{n_0 + n_1^2/n_g} \right]^2 \quad (1)$$

用高、低折射率交替的, 每层 $\lambda_0/4$ 厚的介质多层膜能够得到更高的反射率。这是因为从膜系所有界面上反射的光束, 当它们回到前表面时具有相同位相, 从而产生相长干涉, 对这样一组介质膜系, 在理论上可望得到十分接近于 100% 的反射率^[2]。

如果 n_H 和 n_L 是高低折射率层的折射率, 并使介质膜系两边的最外层为高折射率层, 其每层的厚度均为 $\lambda_0/4$, 对于中心波长 λ_0 组合导纳为

$$Y = \left[\frac{n_H}{n_L} \right]^{2S} \times \frac{n_H^2}{n_g} \quad (2)$$

式中, n_g 为基片的折射率; $2S+1$ 为多层膜的层数。因而, 在空气中垂直入射时, 中心波长 λ_0 的反射率, 也即极大值反射率为

$$R = \left[\frac{1 - (n_H/n_L)^{2S} (n_H^2/n_g)}{1 + (n_H/n_L)^{2S} (n_H^2/n_g)} \right]^2 \quad (3)$$

n_H/n_L 比值越大, 或层数越多, 则反射率越高。

理论上只要增加膜系的层数, 反射率可无限地接近于 100%。实际上由于膜层中的吸收、散射损失, 当膜系达到一定层数时, 继续加镀两层并不能提高其反射率。有时甚至由于吸收、散射损失的增加, 而使反射率下降。因此, 膜系中的吸收和散射损耗限制了介质膜系的最大层数。

2 多层反射膜系的反射特性研究

多层反射膜系是高低折射率材料膜层在基底上交替叠加而成, 可分为两类:

一类是传统的四分之一波长的反射膜系, 高折射率膜层(H)与低折射率膜层(L)的光学厚度相等均为四分之一入射光的中心波长 λ_0 , 一个膜系周期 $H+L$ 其光学厚度之和为二分之一入射光的中心波长。

另一类是非四分之一波长膜厚的反射膜系, 即在四分之一波长的反射膜系的基础上, 变化高折射率材料膜层的厚度偏离四分之一入射光的中心波长 λ_0 , 同时保持一个膜系周期 $H+L$ 其光学厚度之和为二分之一入射光的中心波长 λ_0 。

薄膜光学的理论指出, 传统的四分之一波长的反射膜系, 仅在基频(对应 λ_0 处)和奇数倍频处也会出现反射带。而非四分之一波长的反射膜系, 不仅会在基频和奇数倍频处出现反射带, 还会在偶数倍频处出现反射带。

以 SiO_2 为低折射率材料($n=1.2$), 表示为 S , ZrO_2 为高折射率材料($n=1.7$), 表示为 Z , dZ 和 dS 分别为 ZrO_2 膜层和 SiO_2 的光学厚度。入射波的中心波长为 1064 nm。不考虑膜层之间的渗透, 用膜系设计软件 Essential Macloed^[3], 计算总结了非四分之一波长膜厚的反射膜系中高折射率膜层的光学厚度对薄膜反射带分布的影响。

经过大量的计算, 发现当 dZ 的数值偏离 0.25 时, 并不一定会同时出现奇数倍频和偶数倍频的全部反射带, 表 1 显示了各个倍频反射带的反射率 $R < 5\%$ (几乎不出现反射带) 时的情况以及对应的 dZ 值。

表 1 各倍频反射带 $R\%$ 与 dZ 的关系

Tab. 1 Relationship between zones of reflection $R\%$ and dZ

倍频	dZ								
	0.10	0.12	0.16	0.20	0.25	0.30	0.34	0.38	0.40
1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	—	—	—	—	<5%	—	—	—	—
3	—	—	<5%	—	—	—	<5%	—	—
4	—	<5%	—	—	<5%	—	—	<5%	—
5	<5%	—	—	<5%	—	<5%	—	—	<5%

可发现表 1 关于 $dZ=0.25$ 对称, $dZ=0.25$ 时会出现基频、三倍频和五倍频三个反射带; 在表

中的其他 dZ 值时, 只会出现四个反射带, 少一个奇数倍频或一个偶数倍频。

这一结果为设计特殊的多层膜系,提供了理论依据。

3 特殊的多层介质反射膜系的设计实例

如要设计一个膜系,入射波长 1064 nm,要求在基频和二倍频处高反,反射率在 90% 以上,而在三倍频处增透,透射率在 90% 以上。

具体设计时,避免了以往膜系设计时大量烦琐

的计算和摸索,只要在表 1 中查找,便可发现当 dZ 在 0.16 和 0.34 两处附近变化时,膜系的反射率在三倍频处很小。因此,将膜系中高折射率材料膜层的光学厚度锁定在 0.16 或 0.34 附近。

根据几种常见的多层反射膜的叠加方式,设计四种不同的膜系 $G(ZS) * N ZA, G(ZS) * N A, G(SZ) * NSA, G(SZ) * NA$,利用膜系设计软件 Essential Macloed,对每种膜系在基频、二倍频、三倍频处的反射率 $R\%$ 进行计算,几种膜系设计方案和它们特性的比较如表 2 所示。

表 2 各种膜系的反射率结果比较

Tab.2 Computed results of the reflectance for all kinds of coatings

膜 系	dZ	R %			膜层数	反射率曲线
		355	530	1065		
G(ZS) * 6ZA	0.160	14.619 5	96.606 7	95.705 4	13	见图 1
	0.165	5.228 5	96.098 0	96.047 8		
	0.170	6.913 8	95.434 4	96.347 5		
	0.175	18.896 6	94.568 1	96.609 8		
	0.325	20.137 2	94.565 6	96.615 0		
	0.330	7.592 1	95.400 4	96.353 7		
	0.335	4.933 2	96.040 6	96.055 2		
	0.340	13.481 0	96.531 4	95.714 1		
G(ZS) * 7A	0.160	13.606 1	95.308 5	94.337 0	14	见图 2
	0.165	5.169 6	94.677 9	94.755 2		
	0.170	6.551 7	93.864 4	95.123 6		
	0.175	17.175 5	92.815 4	95.447 9		
	0.325	18.611 8	92.935 6	91.755 8		
	0.330	7.303 4	93.929 0	95.138 5		
	0.335	4.845 3	94.700 3	94.772 4		
	0.340	12.337 7	95.298 3	94.356 9		
G(SZ) * 6	0.16	12.730 1	94.143 9	92.822 3	12	见图 3
	0.165	5.086 8	93.399 5	93.317 9		
	0.170	6.369 8	92.448 2	93.756 7		
	0.175	16.085 7	91.234 6	94.145 0		
	0.325	17.321 1	91.368 7	94.159 4		
	0.330	7.006 7	92.525 4	93.773 2		
	0.335	4.815 3	93.433 0	93.336 8		
	0.34	11.649 5	94.143 3	92.844 1		
G(SZ) * 6SA	0.16	12.730 1	94.143 9	92.822 3	13	见图 4
	0.165	5.086 8	93.399 5	93.317 9		
	0.170	6.369 8	92.448 2	93.756 7		
	0.175	16.085 7	91.234 6	94.145 0		
	0.325	17.321 1	91.368 7	94.159 4		
	0.330	7.006 7	92.525 4	93.773 2		
	0.335	4.815 3	93.433 0	93.336 8		
	0.34	11.649 5	94.143 3	92.844 1		

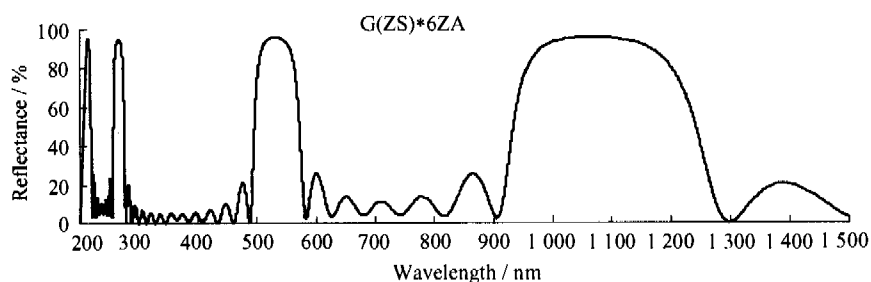


图1 膜系 G(ZS) * 6ZA 的反射率曲线

Fig.1 Reflectance of coating series G(ZS) * 6ZA

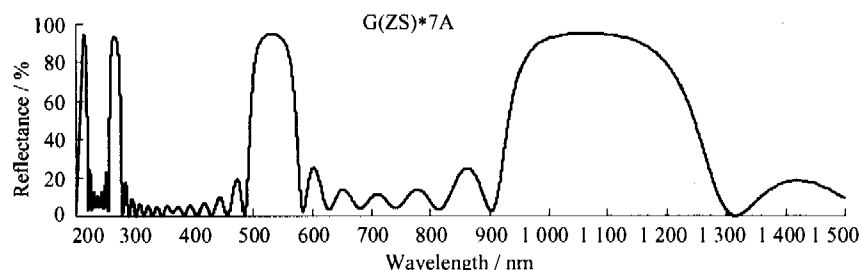


图2 膜系 G(ZS) * 7A 的反射率曲线

Fig.2 Reflectance of coating series G(ZS) * 7A

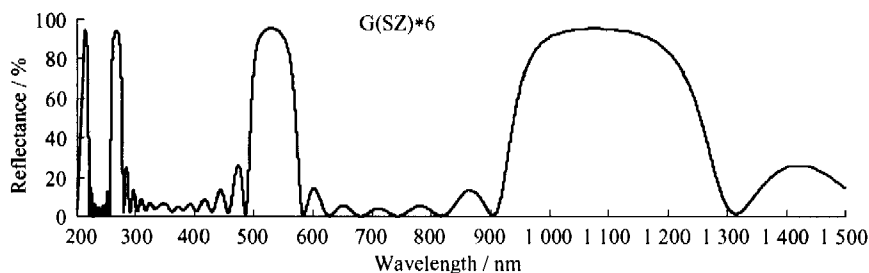


图3 膜系 G(SZ) * 6 的反射率曲线

Fig.3 Reflectance of coating series G(SZ) * 6

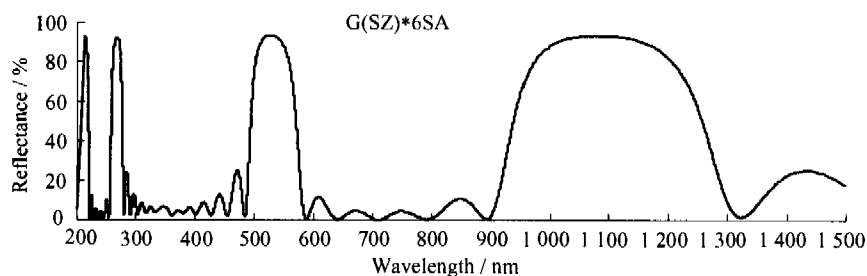


图4 膜系 G(SZ) * 6SA 的反射率曲线

Fig.4 Reflectance of coating series G(SZ) * 6SA

由图1~图4可知,以上四种膜系均能达到要求。但由于膜层中的吸收、散射损失的限制,以及随着膜层数的增加而导致镀膜难度的增加,设计的膜系应尽量选择层数少的膜系。所以选择的膜系为 G(ZS) * 6ZA 或 G(SZ) * 6A,此时 dZ 在 0.165

~0.170之间或 0.335~0.330 之间变化时的效果最好 dZ 值在此附近小范围偏移也不会影响效果。

通过计算膜系中各膜层的物理厚度,来寻找适合的镀膜方式。如表3所示,可见在最佳的膜系设计中,只有厚度的误差范围 1.5%~3.0%以内,才

能达到要求。

溶胶凝胶化学法镀膜^[4]每层膜的厚度误差仅能控制在 20% 以内,而传统的物理镀膜则可以精确控制每层膜的物理厚度到纳米量级。因此,此类特殊要求的膜系,用溶胶凝胶法完成整个膜系难度很大,可以考虑用物理镀膜镀制。

表 3 各种膜系中膜层的物理厚度
Tab.3 Physical length of the layers in all kinds of coatings

dZ	Z(nm)	S(nm)
0.160	97.02	305.07
0.165	100.77	300.58
0.170	103.83	296.10
0.175	106.88	291.61
0.325	198.49	157.02
0.330	201.55	152.53
0.335	204.60	148.05
0.340	207.66	143.56

4 结 论

本文利用理论计算与计算机模拟,对非四分之一波长的多层反射膜系的反射特性进行计算,总结出高折射率薄膜的光学厚度与膜系的倍频反射带之间的关系,并通过对特殊膜系的设计实例充分证明了本研究结果对多层反射膜的设计乃至适合实验方案的选取都具有一定的指导作用。

参考文献:

[1] 沈 军,王 珊,吴广明,等. 多层反射膜的理论设计与光学特性分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005,33(5):659~663.

[2] 唐晋发,郑 权. 应用薄膜光学[M]. 上海:上海科学技术出版社,1983.27~67,168~198.

[3] Essential Macleod Optical Coating Design Program user 's manual[Z]. USA:Thin film Center, 1997.1~166.

[4] 丁子上,翁文剑. 溶胶——凝胶技术制备材料进展[J]. 硅酸盐学报, 1993,(5):440~450.

(上接第 48 页)

5 结 语

本文给出了 OpenGL 交互技术应用的基本方法,交互技术与其他相应技术相结合,可以绘制出逼真的具有真实感的三维图形。

参考文献:

[1] 汤 彬. 使用 MFC 的 OpenGL 编程技术[J]. 实验室

研究与探索, 2004,(9):53~56.

[2] Woo M,Neider J,Davis T,et al. OpenGL 编程权威指南[M].吴 斌译. 北京:中国电力出版社,2000.

[3] Divid J K. Visual C++ 技术内幕(第 4 版)[M]. 潘爱民译. 北京:清华大学出版社,2002.

[4] Swright R,Sweet M. OpenGL 超级宝典(第二版)[M]. 潇湘工作室译. 北京:人民邮电出版社,2001.

[5] 唐荣锡,汪嘉夜. 计算机图形学教程(修订版)[M]. 北京:科学出版社,2000.