

# 用超薄金属膜和不对称法布里-珀罗干涉滤光片设计窄带高反膜

谭满清 林永昌

(北京理工大学光电工程系, 北京 100081)

**摘 要** 提出利用  $n \approx k$  的金属膜层材料设计窄带高反膜的一种新方法——用超薄金属膜与不对称法布里-珀罗干涉滤光片组合设计法。给出了可见光区的窄带高反膜的膜系结构; 定量地分析了膜系的反射率、反射峰值、反射半波带宽等光谱反射特性。实验证实了理论设计和分析。同时, 也提供了设计非可见光波段的窄带高反滤光片的方法。

**关键词** 超薄金属膜, 反射率, 高反膜, 滤光片。

## 1 引 言

窄带高反膜有许多重要应用, 例如: 用窄带高反膜制作反射式紫外滤光片<sup>[1]</sup>; 可见光区彩色装饰、防伪、特技摄影; 特别是波长在 1250 nm 至 1600 nm 区域的红外窄带高反膜, 在光纤通讯领域有许多重要的应用<sup>[2~4]</sup>, 等等。许多学者在这方面作了有意义的工作<sup>[2~7]</sup>。

窄带高反膜可以用全介质材料设计<sup>[1]</sup>; 也可以用金属膜与介质膜组成的周期结构设计<sup>[5~7]</sup>。但这些方法设计的膜层都在四十层以上, 尤其是全介质膜系达上百层, 膜系镀制困难很大。

本文根据  $n \approx k$  的金属膜层材料(如 Cr、Ni、Pt)的吸收特性, 提出了用超薄 Cr 膜与不对称 F-P 干涉膜组合设计可见光区的窄带高反膜。这种膜系具有如下几方面的优点: 1) 膜系结构简单、层数少、膜系比较规整; 2) 在膜系性能上, 容易实现峰值反射率高、反射截止度高、截止带宽的超窄带; 3) 在膜系镀制上, 多数膜层用普通的极值法、个别膜层如薄金属膜层用定值法监控即可实现。

## 2 基本理论

### 2.1 膜系的反射率

为便于分析, 把膜系表示成通用的形式:  $A/\text{Cr}x\text{L}(\text{HL})^N(\text{LH})^N(\text{LH})^J/\text{G}$  (如图 1 所示)。其中,  $N$ 、 $J$  均为正整数, 通常  $J > N$ ;  $x$  为位相

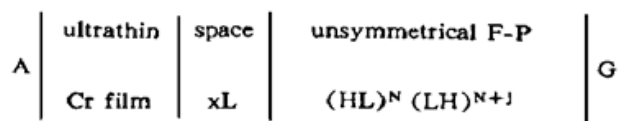


Fig. 1 Schematic structure of the reflection filter coatings

调整因子, 它使膜系在中心波长处反射极大。假定: Cr 的复折射率为  $n - jk$  ( $n \approx k^{18}$ )、几何厚度为  $d$ ; 介质材料  $H$ 、 $L$  的折射率分别为  $n_2$ 、 $n_1$  ( $n_2 > n_1$ ); 入射介质 A、出射介质 G 的折射率分别为  $n_0$ 、 $n_g$ 。

所谓超薄 Cr 膜是指 Cr 膜的几何厚度  $d \ll \lambda_0$ 。因此, 在垂直入射的情况下, 超薄 Cr 膜的干涉矩阵  $m$  可近似表示为:

$$m \approx \begin{bmatrix} 1 & j \frac{2\pi d}{\lambda} \\ j \frac{2\pi d}{\lambda} (n - jk)^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

设膜系  $xL(HL)^N(LH)^{(N+J)}/G$  的等效导纳为  $Y = Y' + jY''$ 。则整个膜系的矩阵为:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = m \begin{bmatrix} 1 \\ Y \end{bmatrix} \quad B' \approx \begin{bmatrix} 1 + j \frac{2\pi d}{\lambda} (Y' + jY'') \\ j \frac{2\pi d}{\lambda} (n - jk)^2 + (Y' + jY'') \end{bmatrix} B' \quad (2)$$

其中,  $B'$  为膜系  $xL(HL)^N(LH)^{(N+J)}/G$  的矩阵元。于是, 膜系的反射率  $R$  为:

$$R \approx \frac{[n_0 - n_0 \frac{2\pi d}{\lambda} Y'' - \frac{2\pi d}{\lambda} (2nk) - Y']^2 + [n_0 \frac{2\pi d}{\lambda} Y' - \frac{2\pi d}{\lambda} (n^2 - k^2) - Y'']^2}{[n_0 - n_0 \frac{2\pi d}{\lambda} Y'' + \frac{2\pi d}{\lambda} (2nk) + Y']^2 + [n_0 \frac{2\pi d}{\lambda} Y' + \frac{2\pi d}{\lambda} (n^2 - k^2) + Y'']^2} \quad (3)$$

相对于材料 Cr 而言,  $n$ 、 $k$  乘积为一较大量, 所以  $R$  表达式中含  $nk$  的项与其它各项同数量级, 对  $R$  值的影响极大。若 Cr 膜后续的膜系选取适当, 可使  $R$  在除中心波长之外的相当宽的波长范围内趋于零, 光几乎全被超薄 Cr 膜吸收; 在中心波长处使  $Y'$  或  $Y''$  趋向于无穷大, 此时  $R \rightarrow 1$ , 达到最大反射率。若 Cr 膜厚度增加到 40 nm 以上时, 光几乎不能透过 Cr 膜, 膜系的干涉效应消失, 膜系的反射实际成为 Cr 单层膜的反射, 膜系的反射光谱选择性变得很差。

## 2.2 中心波长处的极大反射率 $R_{0\max}$

中心波长处, 介质膜系  $(HL)^N(LH)^N(LH)^J/G$  的等效导纳为:

$$Y_0 = \left[ \frac{n_1}{n_2} \right]^{2J} n_g$$

那么, 此时整个膜系的矩阵为:

$$\begin{bmatrix} B_0 \\ C_0 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \cos \frac{\pi x}{2} - \frac{2\pi d n_1}{\lambda_0} \sin \frac{\pi x}{2} + j Y_0 \left[ \frac{1}{n_1} \sin \frac{\pi x}{2} + \frac{2\pi}{\lambda_0} \cos \frac{\pi x}{2} \right] \\ j \frac{2\pi d}{\lambda_0} (n - jk)^2 \left[ \cos \frac{\pi x}{2} + j \frac{Y_0}{n_1} \sin \frac{\pi x}{2} \right] + j n_1 \sin \frac{\pi x}{2} + Y_0 \cos \frac{\pi x}{2} \end{bmatrix} B'_0 \quad (4)$$

这里,  $B'_0$  是介质膜系  $(HL)^N(LH)^N(LH)^J/G$  的矩阵元。将(4)式代入膜系的反射率计算式:

$$R_0 = \left[ \frac{n_0 B_0 - C_0}{n_0 B_0 + C_0} \right] \left[ \frac{n_0 B_0 - C_0}{n_0 B_0 + C_0} \right]^* \quad (5)$$

可得中心波长处膜系的反射率值, 当  $x = 2W + 1$  ( $W = 0, 1, 2, \dots$ ) 时,  $R_0$  取极大值  $R_{0\max}$ 。

$$R_{0\max} \approx \frac{[n_0 \frac{2\pi d n_1}{\lambda_0}]^2 + [\frac{n_0}{n_1} Y_0 - \frac{2\pi d}{\lambda_0} (2nk) \frac{Y_0}{n_1} - n_1]^2}{[n_0 \frac{2\pi d n_1}{\lambda_0}]^2 + [\frac{n_0}{n_1} Y_0 + \frac{2\pi d}{\lambda_0} (2nk) \frac{Y_0}{n_1} + n_1]^2} \quad (6)$$

当  $J \rightarrow \infty$  时,  $Y_0 \rightarrow 0$ ,  $R_{0\max} \rightarrow 1$ 。本文取  $x = 1$  的特例, 此时膜系结构为  $A/CrL(HL)^N$

$(LH)^{(N+J)}/G$ 。

膜系中, 位相调整因子  $x$  取奇数, 是因为在一级近似下, 超薄 Cr 膜的位相厚度可以忽略。实际上, 因超薄 Cr 膜存在一定的位相厚度(尽管很小), 所以在膜系设计中, 一级次的  $x$  值随中心波长及 Cr 的几何厚度的变化而取 0.90~0.99 等不同的值。

### 2.3 膜系的相对反射半宽度的近似计算公式

设波长有一微小的变化, 即  $\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda$ , 相应的 L、H 层的位相厚度由  $\pi/2$  到  $\pi/2 + \Delta\delta$ 。 $\Delta\delta$  与  $\Delta\lambda$  的关系为:

$$\Delta\delta \approx -(\pi/2)(\Delta\lambda/\lambda_0) \quad (7)$$

当  $J \rightarrow \infty$  时,  $R_{\max} = 1$ , 此时半波波长处的反射率  $R_{0.5} = 0.5$ 。应用微扰法, 保留 L、H 层干涉矩阵中位相厚度微变化量  $\Delta\delta$  的一次项, 忽略高阶无穷小量, 得到反射半波带宽的近似公式为:

$$2\Delta\lambda_{0.5} \approx \frac{4|A|\lambda_0}{\pi \sqrt{6n_0 \frac{2\pi}{\lambda_0} d(2nk) - n_0^2 - \left[ \frac{2\pi}{\lambda_0} d(2nk) \right]^2}} \quad (8)$$

其中:

$$A = \frac{n_1}{1 + \frac{2n_1}{n_2 - n_1} \left[ 1 - \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^{2N+2} \right] - \frac{n_2^2}{n_1(n_2 - n_1)}}$$

于是, 相对半宽度的近似公式可表示为:

$$\frac{2\Delta\lambda_{0.5}}{\lambda_0} \approx \frac{4|A|}{\pi \sqrt{6n_0 \frac{2\pi}{\lambda_0} d(2nk) - n_0^2 - \left[ \frac{2\pi}{\lambda_0} d(2nk) \right]^2}} \quad (9)$$

(9) 式表明: 该膜系的相对半宽度既决定于 Cr 层的  $n$ 、 $k$ 、 $d$ , 也决定于  $n_1$ 、 $n_2$ 、 $N$  值。定量分析表明: 若  $N > 0$ , 相对半宽度主要决定于  $n_1$ 、 $n_2$  和  $N$ 。

(9) 式对  $d$  微分可得: 膜系的相对半宽度取极小值时, 超薄 Cr 膜的最佳厚度为:

$$d = 3n_0 / \left[ (2\pi/\lambda_0)(2nk) \right] \quad (10)$$

## 3 膜系设计实例

图 2 为膜系 A/HCr0.97LH2LH(LH)<sup>5</sup>/G 的光谱反射特性曲线和吸收特性曲线, 膜系共 16 层。A 为入射介质, G 为出射介质, 膜系中折射率参数为:  $n_H$ 、 $n_L$ 、 $n_A$ 、 $n_G$  分别为: 2.35、1.32、1.52、1.00;  $N = 1$ ,  $J = 5$ ; Cr 膜厚度为 5 nm; 中心波长为 520 nm; 膜系反射特性为:  $R_{\max} = 95.6\%$ 、相对半宽度为 2.02%。为使主膜系与入射介质 A 匹配, 在入射介质 A 与 Cr 膜之间插入匹配膜堆 H。

图 3 的膜系为 A/HCr0.97L(HL)<sup>2</sup>(LH)<sup>7</sup>/G, 与图 2 的膜系比较, 除  $N = 2$  外, 其它参数相同。此时膜系的峰值反射率几乎不变, 但相对半宽度降为 0.65%。

以上两例都考虑了实际镀制的可能性, 所以  $J$  只取 5,  $R_{\max} < 1$ 。若  $J$  取得较大,  $R_{\max}$  趋向于 1。图 4 是  $N = 1$ 、 $J = 7$  的结果, 此时,  $R_{\max} = 98.2\%$ 。

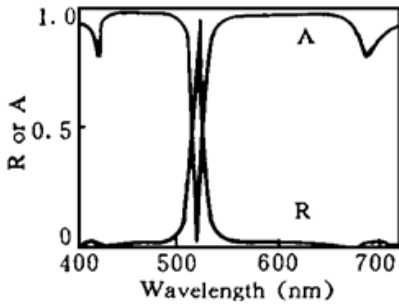


Fig. 2 Calculated spectral reflection or absorption properties of the multilayer coatings A/HCr 0.97LH2LH(LH)<sup>5</sup>/G at normal incidence

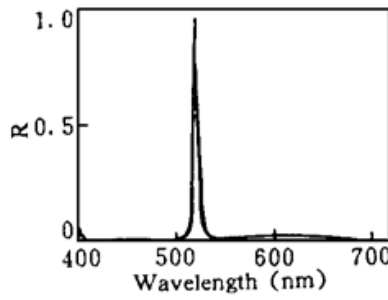


Fig. 3 Calculated spectral reflection properties of the multilayer coatings A/HCr0.97L(HL)<sup>2</sup>(LH)<sup>7</sup>/G at normal incidence

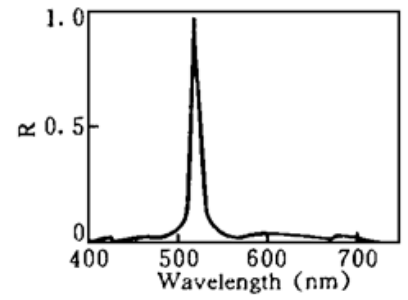


Fig. 4 Calculated spectral reflection properties of the multilayer coatings A/HCr0.97LH2LH(LH)<sup>7</sup>/G at normal incidence

### 4 膜系镀制

对该类膜系的设计, 作者镀制了中心波长不同的几种窄带高反滤光片, 其中的一种是:

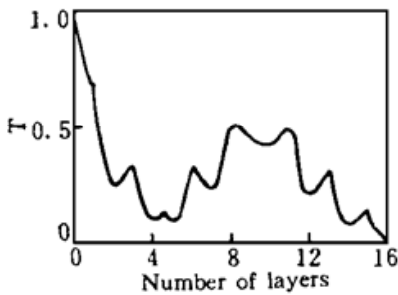


Fig. 5 Monitored transmittivity curve of the multilayer coatings G/HCr0.97LH2LH(LH)<sup>5</sup>/A,  $d_{Cr} = 5$  nm,  $n_1 = 1.32$ ,  $n_2 = 2.35$ ,  $\lambda_0 = 520$  nm,  $n_G = 1.52$ ,  $n_A = 1.0$

用 DMD-700J 型镀膜机蒸镀膜系为 A/(HL)<sup>5</sup>H2LH0.97LCrH/G 的薄膜, 其中, A 为空气, G 为基板。膜系材料为金属 Cr、ZnS ( $n_2 = 2.35$ )、Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> ( $n_1 = 1.32$ ); Cr 膜几何厚度为 5 nm; 膜系的中心波长为 520 nm; 蒸镀参数为: 真空度:  $3 \times 10^{-3}$  Pa, 基板温度: 30°C, 监控波长: 520 nm, 介质材料的蒸发速率: 3 nm/s, 金属材料的蒸发速率相对要慢很多。膜系监控曲线如图 5 所示, 注明★的数据走定值, 其它的走极值。

表 1 是镀制膜系测量值、计算机辅助设计程序的计算值以及用前面(6)式和(9)式计算的理论值, 测量是在 Lambda 19 分光光度计上进行的, 三者的入射介质均为玻璃、出射介质均为空气。表 1 表明: 测量结果、设计值、理论值三者接近, 由此证明了膜系设计与理论分析的正确性。

Table 1. Comparison of Measured, Design and Theoretical filter reflection properties

	incidence angle (°)	$\lambda_{max}$ (nm)	$2\Delta\lambda_{0.5}/\lambda_{max}$ (%)	$R_{max}$ (%)
measured	7.5	517.1	2.10	95.1
design	7.5	516.2	2.02	95.5
design	0	520.0	2.02	95.6
theoretical	0	520.0	1.91	96.1

### 5 结论与分析

从以上的分析, 可概括以下几点:

1) 该类膜系是目前设计窄带高反滤光片的较理想模式。它结构简单、规范, 容易镀制, 膜系的窄带高反特性亦好;

该类膜系利用了超薄 Cr 膜和不对称法布里-珀罗滤光片的光学特性得以实现窄带高反的效果。若在非可见光区, 如紫外和红外, 只要选取该波段上  $n \approx k$  的金属薄膜材料作为超薄膜

材料, 使用该类膜系, 同样可以设计非可见光区上的比较理想的窄带高反滤光片。

2) 对于这类膜系, 吸收率  $A \propto n \cdot k$ 。可见光区 Cr 的  $n \cdot k$  值较大, 为此用 Cr 膜作为超薄膜层, 有利于实现非中心波长处较深的反射抑制带;

3) 公式(9)表明: 相对半宽度正比于  $|A|$ , 而  $A$  强烈地依赖于介质膜系  $(HL)^N(LH)^N$  中的参数  $n_1$ 、 $n_2$ 、 $N$ , 为此, 只要选取合适的  $n_1$ 、 $n_2$ 、 $N$  即可达到所要求的带宽, 在  $n_1$ 、 $n_2$  固定的情况下, 增大  $N$ , 反射半宽度显著减少;

4) 膜系设计实例表明: 膜系的峰值反射率受参量  $n_1$ 、 $n_2$ 、 $J$  的影响较大, 而膜系的反射相对半宽度受  $n_1$ 、 $n_2$ 、 $N$  的影响大些, 所以, 在确定参量  $n_1$ 、 $n_2$  后, 可以通过分别改变  $J$ 、 $N$  来同时实现较大的峰值反射率和较小的反射带宽, 而相互的影响不大;

5) 该膜系高反射窄带区之外的较大区域有强吸收(如图 2 所示), 为此, 对于窄带光谱光源, 它有很好的应用前景; 而对于宽带强光源, 其应用将会受到一定程度的限制。

### 参 考 文 献

- [1] 林永昌等编著, 光学薄膜原理. 北京, 国防工业出版社, 1990: 306~ 307
- [2] R. Gamble, Paul H. Lissberger, Reflection filter multilayers of meatallic and dielectric thin films. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(14): 2838~ 2846
- [3] D. B. Payne, J. R. Sterm, Transparent single Mode Fiber Optical Networks. *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, 1986, **LT-4**(7): 864~ 869
- [4] S. R. Mallinson, Wavelength-selective filters for single-mode fiber WDM svstem using Fabry-Perot interferometers. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(3): 430~ 436
- [5] Eberhard Spiller, Reflective multilayer coatings for the far UV region. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(10): 2333~ 2338
- [6] Jian-shang Sheng, J. T. Lue, Ultraviolet narrow-band rejection filters composed of miltiple metal and dielectric layer. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(28): 6117~ 6121
- [7] Juh-Tzeng Lue, Yam-shyh Hor, Optical filters constructed from multilayers of dielectric and thin metallic films operating in the anomalous akin effect region. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1989, **6**(6): 1103~ 1105
- [8] E. D. Ward Palik, Handbook of optical constants of solids. Academic Press INC., 1991: 375~ 385

## Narrowband Spectral High-Reflectivity Filter Coatings Composed of Ultrathin Metallic Film and Unsymmetrical Fabry-Perot Interfere Filter

Tan Manqing      Ling Yongchang

(Department of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

(Received 8 October 1995; revised 29 January 1996)

**Abstract** A new method for designing narrowband spectral high-reflectivity filters, which combines ultrathin metallic film with unsymmetrical Fabry-Perot interfere filter, is proposed in this paper. The reflection filter utilizes the metallic film material that has a property of  $n \approx k$ . The layer structure in visible spectrum is given. A few of formulas of the spectral reflection properties, such as reflectivity, maximum reflectivity and reflection bandwidth, is derived and is proved by experiment. A method of designing narrowband spectral high-reflectivity filter in non-visible spectrum is provided.

**Key words** ultrathin metallic film, reflectivity, high-reflectivity coatings, filter.