

过渡金属超薄膜的光学性质及其应用

谭满清* 林永昌

(北京理工大学光电工程系 北京 100081)

提要 讨论了单层过渡金属超薄膜以及它与介质膜组成的多层膜的光学特性, 对它们进行了定量的分析, 并以实例说明了过渡金属超薄膜在中性分光镜、窄带高反滤光片等方面的应用。

关键词 过渡金属, 超薄金属膜, 反射率

1 引 言

在光学薄膜方面, 过渡金属(如 Ti, V, Cr, Mn, Ni 等)的最大特点是折射率 n 和消光系数 k 均比较大, 且它们的数值比较接近^[1]。利用这一特点, 用它的超薄膜结构可以设计出宽带、中性分光镜^[2]; 也可设计高反射窄带滤光片, 这种窄带高反滤光片具有反射率高、反射带窄、反射截止度深、容易监控等优点。本文将定量分析过渡金属($n \approx k$) 超薄膜的光学特性, 并阐明其实际的应用。

2 过渡金属超薄膜的光学性质

2.1 过渡金属超薄膜与其后续的多层膜组成的膜系的反射率

超薄金属膜是指金属膜的几何厚度 d 远小于中心波长 λ_0 。假定 M 表示过渡金属超薄膜, $\bar{\eta}$, $\bar{\delta}$ 分别表示 M 的复折射率和复位相厚度, 在光垂直入射时, $\bar{\eta} = n - jk$, $\bar{\delta} = \frac{2\pi}{\lambda} \eta d$ 。于是过渡金属超薄膜的干涉矩阵 m 近似为

$$m = \begin{bmatrix} \cos \bar{\delta} & j \frac{\sin \bar{\delta}}{\bar{\eta}} \\ j \bar{\eta} \sin \bar{\delta} & \cos \bar{\delta} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1 & j \frac{2\pi d}{\lambda} \\ \frac{2\pi d}{\lambda} (2nk) & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

假定后续的多层膜的等效导纳 Y 为 $Y' + jY''$, 则过渡金属超薄膜与后续的多层膜组成的膜系的反射率 R 为

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

* 现在工作单位: 中国科学院半导体研究所工程中心, 北京 100083。

式中 n_0 为入射介质的折射率。

尽管 $\frac{2\pi}{\lambda}d$ 为一微量, 但因为 $n \cdot k$ 为一较大的量, 所以(2) 式中, 包含有 $n \cdot k$ 的项仍有较大的值, 对膜系的反射率影响极大。若设计中心波长处 $Y' = 0, Y'' \rightarrow \infty$, 可以使中心波长处反射率接近 1, 达到最大透增反的效果, 实现窄带高反滤光。

2.2 过渡金属超薄膜与介质膜组成的基本对称周期(2LM2L)的等效导纳和等效位相厚度

周期对称膜系可等效成单层膜^[2], 假定 $\bar{\delta}_e, \bar{\eta}_e$ 分别为基本对称周期(2LM 2L)的等效位相厚度和等效导纳, 则结合(1) 式可得, 基本对称周期的等效位相厚度和等效导纳分别为

$$\bar{\delta}_e \approx 2\delta_1$$

$$\bar{\eta}_e \approx \sqrt{\frac{n_1 \sin 2\delta_1 - \frac{\bar{\delta} n_1^2 \sin 2\delta_1}{\eta} + \bar{\delta} \eta \cos 2\delta_1}{\frac{\sin 2\delta_1}{n_1} - \frac{\eta \sin 2\delta_1}{n_1^2} + \frac{\bar{\delta} \cos 2\delta_1}{\eta}}} \quad (3)$$

其中, δ_1 为介质膜层 2L 的位相厚度, 且当 $\lambda = \lambda_0$ 时, $\delta_1 = \pi$ 。

用(3) 式计算的基本对称周期 2LCr2L 的等效导纳的模 $|\bar{\eta}_e|$ 随波长 λ 的变化特性见图 1。图中过渡金属 Cr 超薄膜的几何厚度为 4 nm, 介质膜 2L 的折射率为 1.42, 中心波长为 530 nm。图中表明 $|\bar{\eta}_e|$ 在 λ_0 处有一很大的突变峰值, 这说明该类周期对称膜系在 λ_0 处有窄带反射峰。

值得说明一下, 基本对称周期(2LM 2L) 中低折射率的介质膜层 L 前的系数为 2, 是因为在一级近似下, 忽略了超薄金属膜 M 的位相厚度。实际上, 因超薄金属膜 M 存在一定的位相厚度(尽管很小), 所以, 膜系设计中, 基本对称周期中介质膜层 L 前的系数随中心波长及 M 的厚度的变化而取 1.90~ 1.99 等不同的值, 以保证基本对称周期在波长 λ_0 处的位相厚度为 2π 。

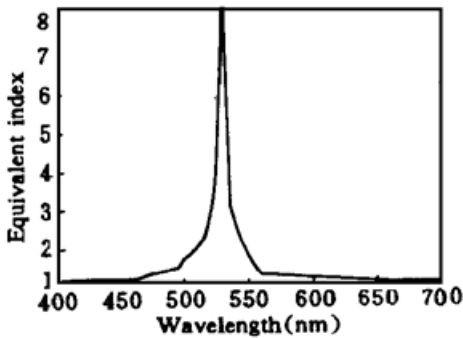


图 1 基本对称周期 2LCr2L 等效导纳的模 $|\bar{\eta}_e|$ 随波长 λ 的变化曲线

Fig. 1 Equivalent optical admittance for a symmetrical three-layer of 2LCr2L $d_{Cr} = 3 \text{ nm}, n_1 = 1.42, \lambda_0 = 530 \text{ nm}$

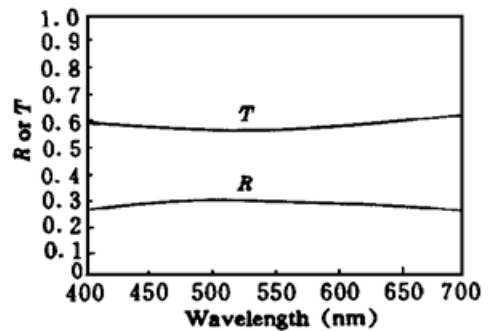


图 2 膜系 A/CrH/G 的透、反射光谱特性曲线
Fig. 2 The optical properties of the multilayer coatings A/CrH/G

$\lambda_0 = 550 \text{ nm}, n_A = 1.00, n_G = 1.52, n_H = 2.00, \theta_0 = 45^\circ$

3 应 用

3.1 分光镜的设计

用过渡金属超薄膜能设计性能良好的中性分光镜。因它的单层膜吸收较大, 所以往往用它

与介质膜组成的多层膜系设计分光镜。图 2 是分光膜系 A/CrH/G 的光谱特性, 膜系参数为金属 Cr 膜的几何厚度为 3 nm, $\lambda_0 = 550$ nm, $n_A = 1.00$, $n_G = 1.52$, $n_H = 2.00$, $\theta_0 = 45^\circ$ 。该膜系的分光比为 $T : R = 2 : 1$ 。在可见光区, 透(反)射光谱中性好、偏振也小、带宽。不过, 该膜系的分光效率相对于介质分光膜要低一些。

3.2 用单层超薄金属膜、F-P 滤光片和高反银膜组合设计窄带高反膜

图 3 是根据(2)式设计的膜系为 A/Cr0.93HLH2LHLH0.76LA_g/G 的光谱反射特性曲线。膜系参数为: 超薄 Cr, Ag 膜的几何厚度分别为 7 nm, 100 nm, 入射介质 A 的折射率为 1.52, 介质膜 H, L 的折射率分别为 2.35, 1.35, 中心波长 $\lambda_0 = 530$ nm。图 3 的光谱反射曲线表明: 此膜系反射峰值为 96.1%; 相对反射半宽度为 1.25%。该膜系在结构上是由超薄金属膜 Cr, F-P 滤光片(HLH2LHLH)和高反 Ag 膜组成。在对光的作用方面, 用超薄 Cr 膜对非中心波长处实现强吸收, F-P 滤光片压缩反射带宽, 高反 Ag 膜实现高反。

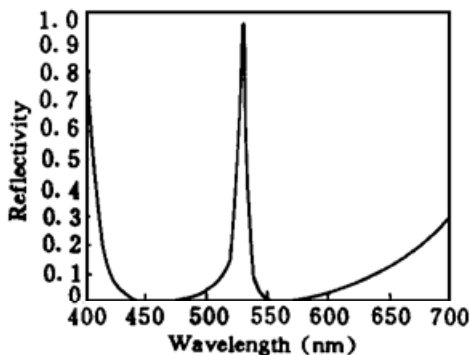


图 3 膜系 A/Cr0.93HLH2LHLH0.76LA_g/G 正入射时的光谱反射曲线

Fig. 3 At normal incidence the reflection properties of the coatings A/Cr0.93HLH2LHLH0.76LA_g/G

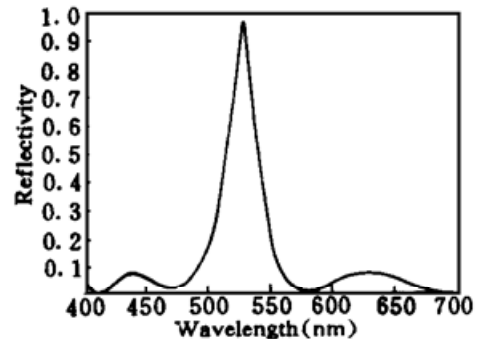


图 4 膜系 A/Cr1.97L(1.97LCr1.97L)²1.76LA_g/G 正入射时的光谱反射曲线

Fig. 4 At normal incidence the reflection properties of the coatings A/Cr1.97L(1.97LCr1.97L)²1.76LA_g/G

3.3 用超薄金属膜与低折射率介质膜的周期对称结构与高反 Ag 膜组合设计窄带高反膜

图 4 是根据超薄金属膜与低折射率介质膜组成的周期对称结构的特性设计的膜系为 A/Cr1.97L(1.97LCr1.97L)²1.76LA_g/G 的光谱反射特性曲线, 膜系参数为每层超薄 Cr 膜、Ag 膜的几何厚度各为 4 nm, 100 nm; $n_L = 1.42$; $\lambda_0 = 530$ nm; 入射介质 A 的折射率为 1.52。在膜系结构上, 该窄带高反膜是由超薄 Cr 膜与低折射率的介质膜组成的周期对称膜系与高反 Ag 膜组成。周期对称膜系压缩了反射带宽度、实现了深的反射截止度, Ag 膜起高反作用。此膜系的峰值反射率为 95.9%, 相对反射半宽度为 5.58%。

4 激光破坏分析

图 5 是图 3 膜系 A/Cr0.93HLH2LHLH0.76LA_g/G 在正入射时的驻波场强分布图, 入射光波长为 530 nm, 图中的纵坐标值为膜层内的驻波场强与入射光波场强的比值。图 5 表明: 吸收较大的金属膜层内的驻波场强值接近于零, 而且膜系中高折射率层的驻波场强也很小, 驻波场强峰值出现在低折射率的 2L 中, 这说明该膜系结构有较大的抗激光损伤阈值, 优于全介质高反膜系。

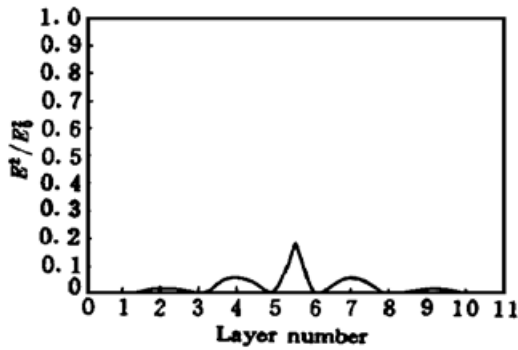


图 5 膜系 A/Cr0.93LHLH2LHLH0.76LA_g/G 正入射时的驻波场强分布, $\lambda = 530\text{nm}$

Fig. 5 At normal incidence, the distribution of the standing wave field of the coatings A/Cr0.93LHLH2LHLH0.76LA_g/G, $\lambda = 530\text{nm}$

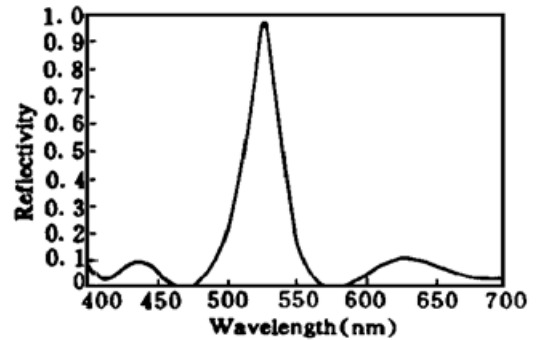


图 6 测量的膜系 G/Cr3.94LCr3.94LCr3.73LA_g/A 的光谱反射特性曲线, 入射角为 7°

Fig. 6 Measured optical reflection properties of the coatings G/Cr3.94LCr3.94LCr3.73LA_g/A at 7° incidence angle

5 膜系镀制实例

我们用 PVD 方法镀制窄带高反膜。图 6 是用 DMD-700J 镀膜机镀制的 G/Cr3.94LCr3.94LCr3.73LA_g/A 膜系的内反射光谱特性曲线, 测量的入射角为 7° 。膜系参数与图 4 一样。膜系镀制时, 用监控膜层透过率实现。图 6 的结论证实了该类膜系设计的正确性。

6 结 论

过渡金属薄膜有较大的吸收, 它们的超薄膜在设计中性分光镜、窄带高反滤光片等方面有重要的应用。而且用它们设计的窄带高反滤光片有较好的抗激光损伤性能。

参 考 文 献

- 1 P. B. Johnson. Optical constants of transition metals: Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, and Pd. *Phys. Rev. B*, 1974, 12(9): 433~ 440
- 2 林永昌 等编著. 光学薄膜原理. 北京: 国防工业出版社, 1990, 103~ 107, 266~ 267

Optical Properties and Applications of Transition Metallic Ultrathin Films

Tan Manqing Lin Yongchang

(Dept. of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract Transition metallic thin films with $n \approx k$ are characterized. The optical properties of transition metallic ultrathin films and the multilayer coatings and other films are quantitatively analyzed, and their applications in neutral beam splitters and in reflection filters of narrow bandwidth and high-reflectivity are discussed.

Key words transition metal, ultrathin metallic film, reflectivity