

石榴石外延膜色散关系的确定 和膜厚的测量

王 立 萱

(中国科学院上海冶金研究所)

1982年4月20日收到

提 要

本文提出了确定石榴石外延膜的色散关系和测量膜厚的一种方法。充分利用分光光度计获得的透射光谱,在波长大于 $2\mu\text{m}$,因而膜和衬底的吸收及色散近于可忽略时,由透过率的极值计算得到相应波长下膜的折射率。按干涉条件计算并推定出所有干涉极值的干涉级数,进而算出各干涉极值波长下膜的折射率。最后用最小二乘法求得科希色散公式的系数,从而得到该膜的色散关系。利用此色散关系就可计算膜厚。

一、引 言

膜厚是石榴石外延膜的一个重要性能参数,它影响磁泡的静态特性^[1],必须控制;另一方面,膜厚的测量精度又直接影响饱和磁化强度、特征长度、光吸收系数和法拉第旋转角等的测量精度^[2-5]。

石榴石外延膜的膜厚常用非破坏性的光学干涉法测量。利用反射或透射光谱计算膜厚的公式为

$$h = \frac{N\lambda}{2\sqrt{n^2 - \sin^2\phi_0}}. \quad (1)$$

在干涉极值相距较远时,也可用

$$h = \frac{\Delta N}{2} \left[\frac{\sqrt{n_i^2 - \sin^2\phi_0}}{\lambda_i} - \frac{\sqrt{n_j^2 - \sin^2\phi_0}}{\lambda_j} \right]^{-1}. \quad (2)$$

这里 ϕ_0 为入射角, N , λ 和 n 分别为反射或透射光谱上某一干涉极值的干涉级数、波长和膜的折射率, ΔN 为相应于 λ_i 和 λ_j 的干涉极值的干涉级数之差。

(1) 和 (2) 式表明,为精确地测定膜厚,必须确知该成分的石榴石外延膜的色散关系。

布儒斯特角法、干涉条纹法、椭圆偏振仪法和可变波长可变入射角综合法等都被用于测定石榴石外延膜的折射率或其色散关系^[6-11]。

Henry 和 Soohoo^[12,13] 曾利用透射光谱上膜和衬底的吸收及色散可忽略的长波长条件下的透过率极值,计算得到相应波长下膜的折射率。Sun^[14] 则先用光波导法精确测定膜

厚和某一特定波长下膜的折射率,再由干涉条件确定成分为 $(Y \text{ Sm Lu Ca})_3(\text{Fe Ge})_3\text{O}_{12}$ 的膜的色散关系.在上述研究的基础上,本文提出了充分利用透射光谱的信息,同时确定石榴石外延膜的色散关系和测量膜厚的一种方法.

二、原 理

我们分别称衬底一面有膜和衬底两面都有膜的试样为单面膜和双面膜.

在垂直入射、衬底足够厚和膜与衬底的吸收及色散可忽略不计的长波长条件下,例如石榴石外延膜在波长大于 $2\mu\text{m}$ 时,按 Henry 和 Soohoo^[12,13] 的推导,可得透射光谱上的透过率极值表达式.

对单面膜:

$$\begin{aligned} T_{\max} &= \frac{2n_s}{1+n_s^2}, \\ T_{\min} &= \frac{4n_s n^2}{n^4 + (1+n_s^2)n^2 + n_s^2}. \end{aligned} \quad (3)$$

对双面膜:

$$\begin{aligned} T_{\max} &= \frac{2n_s}{1+n_s^2}, \\ T_{\min} &= \frac{2n_s^2}{n^4 + n_s^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

这里 n 和 n_s 分别为石榴石外延膜和衬底的折射率,且有 $n > n_s$.

解(3)和(4)式,得石榴石外延膜的折射率表达式.

对单面膜:

$$n = \{(T_{\max}^{-1} + \sqrt{T_{\max}^{-2} - 1})[2T_{\min}^{-1} - T_{\max}^{-1} + \sqrt{(2T_{\min}^{-1} - T_{\max}^{-1})^2 - 1}]\}^{1/2}. \quad (5)$$

对双面膜:

$$n = \{(T_{\max}^{-1} + \sqrt{T_{\max}^{-2} - 1})(T_{\min}^{-1} + \sqrt{T_{\min}^{-2} - 1})\}^{1/2}. \quad (6)$$

从以上分析可知,在测得石榴石外延膜试样的透射光谱以后,可由波长大于 $2\mu\text{m}$ 的 λ_j 处的 $T_{\max}$ 和相邻的 $T_{\min}$ 值,用(5)式(单面膜)或(6)式(双面膜)求出波长为 λ_j 时的膜的折射率 n_j .

我们知道,垂直入射时的干涉条件为

$$2nh = N\lambda. \quad (7)$$

在长波长条件下,由于石榴石外延膜的色散很小,因此可利用干涉条件(7)式,由透射光谱上 $\Delta N = 1$ 的相邻两干涉极值所相应的波长值 λ_j 和 λ_{j-1} 计算出 λ_j 处的干涉级数 N_j .

$$N_j \simeq \frac{\lambda_{j-1}}{\lambda_j - \lambda_{j-1}} \quad (\lambda_j > \lambda_{j-1}). \quad (8)$$

因为 $n > n_s$, 所以,对于相长干涉, N_j 应取按(8)式求得的最近邻正整数. 由所得的 N_j 值推定出透射光谱上所有干涉极值的干涉级数 N_j . 再由

$$n_i = \frac{N_i \lambda_i}{N_j \lambda_j} n_j \quad (9)$$

计算出透射光谱上从可见光到近红外波段的所有干涉极值处相应波长下石榴石外延膜的折射率。

在确定石榴石外延膜的色散关系时,为计算方便,把用(9)式算得的一系列 $n_i - \lambda_i$ 值代入熟知的科希经验公式

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} \quad (10)$$

用电子计算机进行最小二乘法拟合,求得系数 A , B 和 C ,从而可得该成分的石榴石外延膜从可见光到近红外波段的色散关系。

对于成分相近的其它石榴石外延膜,可使用已确定的色散关系,由反射或透射光谱用(1)或(2)式计算膜厚。

三、实验结果和讨论

在(111)取向的 $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ 衬底上用液相外延等温浸渍法生长四种不同成分的石榴

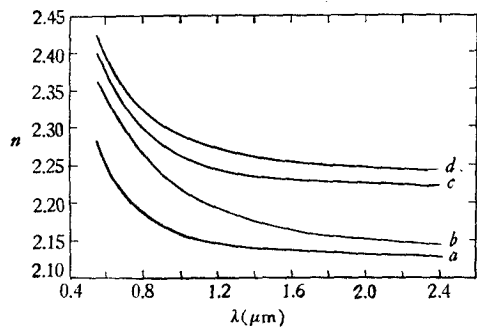


图1 几种石榴石外延膜的色散曲线

a 为 $(\text{YLu})_3(\text{FeSc})_3\text{O}_{12}$;

b 为 $(\text{YEuTm})_3(\text{FeGa})_3\text{O}_{12}$;

c 为 $(\text{BiTm})_3(\text{FeGa})_3\text{O}_{12}$;

d 为 $(\text{BiGdPrYb})_3(\text{FeAl})_3\text{O}_{12}$

石外延膜。用 Specord 型分光光度计测量波长为 $0.4-2.5\mu\text{m}$ 的透射光谱,光照区域为 $\phi 5\text{mm}$ 。测量前,用丙酮和酒精-乙醚擦洗试样,以消除膜面污染对透过率的影响。测得某一试样的透射光谱后,先从光谱图上确定出所有干涉极值处的波长以及波长大于 $2\mu\text{m}$ 时的透过率极值 $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$,再按(8)式求得 N_i 并推定出所有的干涉级数 N_i ,由(5)或(6)式求得 n_i ,继之以(9)式算出各干涉极值处相应波长下膜的折射率 n_i ,最后通过(10)式计算得到该膜的科希色散公式的系数。按上述方法计算得到的四种不同成分的石榴石外延膜的色散曲线如图1。相应的科希系数

和两个特定波长下的折射率列于表1。表1中还列出了我们用椭圆偏振仪法测得的波长为 $0.6328\mu\text{m}$ 时的折射率和文献记载的相近成分在波长为 $1.152\mu\text{m}$ 时的折射率数据^[15-17],以资比较。

对于不同成分的石榴石外延膜,按它们各自的色散关系,由(1)或(2)式可算出一组膜厚值,取其算术平均值,即为膜厚的测量结果。

如上所述,由透射光谱的透过率极值确定的折射率的误差,主要决定于透过率的测量精度和膜厚的均匀性。色散关系和膜厚的误差还与波长的读数误差有关。在透过率的测量精度为 $\pm 0.1\%$,波长的读数误差为 $\pm 0.1\%$ 时,折射率及其色散和膜厚的最大测量误差不大于 $\pm 1\%$ 。在我们的实验条件下,透过率的测量精度和波长的读数误差均为 $\pm 1\%$,

表1 几种石榴石外延膜的科希系数和两种特定波长下的折射率

石榴石外延膜	科希系数			$n(\lambda = 0.6328\mu\text{m})$		$n(\lambda = 1.152\mu\text{m})$	
	A	B(10^{-2})	C(10^{-3})	本文方法	椭圆偏振仪法	本文方法	文献记载
(YLu) ₃ (FeSc) ₃ O ₁₂	2.124	2.830	5.990	2.23	2.22	2.15	2.12*[15]
(YEuTm) ₃ (FeGa) ₃ O ₁₂	2.129	9.926	-8.906	2.32	2.33	2.20	
(BiTm) ₃ (FeGa) ₃ O ₁₂	2.219	2.481	12.810	2.36	2.33	2.25	2.25**[16]
(BiGdPrYb) ₃ (FeAl) ₃ O ₁₂	2.236	4.483	2.654	2.37	2.34	2.27	2.25***[17]

* Y₃(FeSc)₃O₁₂; ** (BiTm)₃(FeGa)₃O₁₂; *** (BiPrYb)₃(FeGa)₃O₁₂.

从而折射率的色散和膜厚的测量误差约为 $\pm 3.5\%$ 。

由于双面膜试样上下两面膜的膜厚不可能完全相同,致使测得的透过率值产生偏差,计算所得的折射率值偏低,色散和膜厚的测量误差增大。因此,一般应采用单面膜试样。

四、结 语

充分利用透射光谱提供的信息,经过简单计算,可以确定石榴石外延膜的色散关系和测量膜厚。已确定的色散关系能用于成分相近的其它石榴石外延膜试样膜厚的计算。用单面膜试样,注意膜面的清洁,采用测量精度高的分光光度计,测得的膜的折射率、色散关系和膜厚的误差不大于 $\pm 1\%$ 。

章熙康同志测量了透射光谱,王亚旗和黄云兰同志计算了科希系数,定稿时得到杨毅同志的有益帮助,作者在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] A. A. Thiele, *Bell Syst. Techn. J.* **50**(1971), 725.
- [2] D. C. Fowles and J. A. Copeland, *AIP conf. proc.* **5**(1972), 240.
- [3] R. M. Josephs, *Ibid.*, **10**(1973), 286.
- [4] S. H. Wemple and J. A. Sernan, *Appl. Optics*, **12**(1973), 2947.
- [5] S. Visnovsky, V. Prosser and R. Krishnan, *J. Appl. Phys.* **49**(1978), 403.
- [6] B. C. McCollum, W. R. Bekebrade, M. Kestigian and A. B. Smith, *Appl. Phys. Lett.* **23**(1973), 702.
- [7] S. H. Wemple and W. J. Tabor, *J. Appl. Phys.*, **44**(1973), 1395.
- [8] R. D. Henry and E. C. Whitcomb, *Mat. Res. Bull.* **10**(1975), 681.
- [9] T. Nakagawa, N. Kono and K. Asama, *IEEE Trans. Magn. Mag-11*(1975), 1397.
- [10] 浪方武志和中川雄彦, *材料科学(日)*, **11**(1974), 28.
- [11] M. Wohlecke and J. C. Suits, *Appl. Phys. Lett.* **30**(1977), 395.
- [12] R. D. Henry and J. Soohoo, *Mat. Res. Bull.* **12**(1977), 727.
- [13] J. Soohoo and R. D. Henry, *J. Appl. Phys.* **49**(1978), 801.
- [14] M. J. Sun, *Appl. Phys. Lett.* **33**(1978), 291.
- [15] J. Daval, B. Ferrand, J. Geynet, D. Challeton, J. C. Peuzin, A. Leclert and M. Monerie *IEEE Trans. Magn.*, **Mag-11**(1975), 1115.
- [16] P. G. Van Engen, *J. Appl. Phys.* **49**(1978), 4660.
- [17] J. Daval, B. Ferrand, D. Challeton and J. C. Peuzin, *Mat. Res. Bull.* **11**(1976), 1031.

DETERMINATION OF THE DISPERSION AND THE MEASUREMENT OF THE THICKNESS OF EPITAXIAL GARNET FILMS

Wang Li-xuan

(*Shanghai Institute of Metallurgy, Academia Sinica*)

ABSTRACT

A technique is proposed for determining the dispersion and measuring the thickness of epitaxial garnet films. Use is made fully of the transmission spectrum obtained by spectrophotometer. When the wave length is greater than $2\mu\text{m}$ so that the absorption and dispersion become negligible, the refractive index at the corresponding wave length may be calculated from the extrema of the transmittance. According to the condition of interference, the order of interference is calculated and deduced for all interference extrema. The refractive indices of the film at the wave lengths corresponding to the interference extrema may be calculated. Finally the coefficients of Cauchy's dispersion formula are evaluated by the method of least squares, thus the dispersion relation is obtained for this film. Then, in making use of the dispersion relation, the thickness of the film may be calculated.