

# 磁光石榴石薄膜的光吸收系数

刘公强 虞志强

(上海交通大学应用物理系)

刘湘林

(中国科学院上海冶金研究所)

**提要:** 分析了引起磁光石榴石薄膜光衰减的各种因素, 导出了光吸收系数  $\alpha$  和光散射系数  $\gamma$  的表达式。采用磁光调制比较法测量了  $(\text{BiTm})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$  薄膜的  $\alpha, \gamma$  值。与通常方法相比, 这种方法不仅消除了衬底吸收, 薄膜-衬底界面反射对测量  $\alpha$  值的影响, 而且可以将  $\gamma$  与  $\alpha$  分离开来, 从而使得到的  $\alpha$  值比较接近于真值。

## Optical absorption coefficient of magneto-optic garnet films

Liu Gongqiang, Yu Zhiqiang

(Department of Applied Physics, Shanghai Jiaotong University)

Liu Xiangling

(Shanghai Institute of Metallurgy, Academia Sinica)

**Abstract:** This paper analyses various factors leading to optical attenuation in magneto-optic garnet films and derives expressions of optical absorption coefficient  $\alpha$  and optical scattering coefficient  $\gamma$ . Values of  $\alpha$  and  $\gamma$  of  $(\text{BiTm})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$  films were measured on the magneto-optic rotation measurement installation by means of the comparison method of the magneto-optic modulation. By comparison with an ordinary method, it can not only eliminate effect of absorption in a substrate and reflection on the interface between a film and a substrate upon measuring the value of  $\alpha$  of garnet films, but also separate optical scattering coefficient  $\gamma$  from optical absorption coefficient  $\alpha$ , so that the measured value of  $\alpha$  comparatively approaches the true value of optical absorption coefficient of magneto-optic garnet film materials.

### 一、引言

精确测定(磁光石榴石)薄膜材料光吸收系数  $\alpha$  是一个相当复杂的问题。通常用 Larsen 给出的简易表达式

$$\alpha = \frac{1}{2h} \ln \frac{(1-R)^2}{T} \quad (1)$$

来计算  $\alpha$ <sup>[1]</sup>。式中薄膜反射率

$$R = \left( \frac{1-n}{1+n} \right)^2,$$

收稿日期: 1984年11月21日。

薄膜折射率  $n$  用椭圆偏振仪测量, 膜系透过率  $T$  用分光光度计测量, 薄膜厚度  $2h$  用干涉显微镜或分光光度计测量。用(1)式计算得到的  $\alpha$  值有如下三个问题: (i) 未扣除衬底材料的光吸收系数  $\alpha_s$ ; (ii) 仅考虑了空气-薄膜界面的反射, 而忽略了薄膜-衬底界面反射的影响; (iii) 未计及膜系光散射的影响。

此外, 有些作者认为膜系干涉效应是影响  $\alpha$  测量的一个重要因素<sup>[2]</sup>, 还进行了详细的分析和复杂的计算。我们认为, 在  $\alpha$  和  $\gamma$  值较大的薄膜材料中, 膜系干涉效应并不重要, 理由是, (i) 以液相外延生长在  $Gd_3Ga_5O_{12}$  衬底上的  $(BiTm)_3(FeGa)_5O_{12}$  薄膜为例(图1), 在光波波长为  $6328 \text{ \AA}$  时, 若取薄膜光衰减系数  $\beta = 800 \text{ cm}^{-1}$ ,  $h = 10 \mu\text{m}$ , 折射率  $n = 2.240$ , 衬底折射率  $n_s = 1.965$ , 空气-薄膜界面反射率  $R_1 = 0.146$ , 薄膜-衬底界面反射率  $R_2 = 0.065$ , 则  $I'' \sim R_1 R_2 e^{-2\beta h} I' = 0.0019 I'$ , 即经第一层薄膜两次反射后的透射光强  $I''$  仅为第一次透射光强  $I'$  的 1.9% 左右,  $I'$  和  $I''$  相差很大, 干涉效应相应很小(但薄膜-衬底界面反射( $R_2$ )对  $\alpha$  测量的影响仍应计及); (ii) 本文对如下所述的三个样品进行了 X 衍射结构分析。发现有个别样品单晶度比较差, 但与材料成分相同、单晶度较好的样品相比较, 其透过率  $T$  和光衰减并无异常变化。显然, 对于厚度不满足光相干条件的那些薄膜, 膜系干涉效应的影响更可忽略不计。

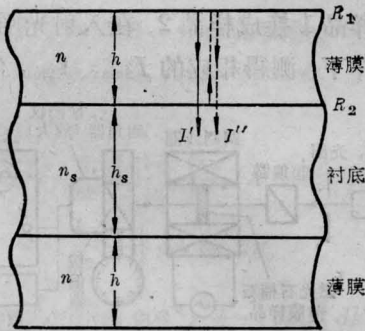


图1 液相外延生长在  $Gd_3Ga_5O_{12}$  衬底上的磁光石榴石薄膜的结构和光学参数

本文考虑了光散射等影响磁光石榴石薄膜光衰减的各种因素, 导出了光吸收系数  $\alpha$  和光散射系数  $\gamma$  的表达式, 在«磁光旋转(法拉第旋转)测试装置»上采用磁光调制比较法测量了薄膜的  $\alpha_0$ 。与Larsen 方法相比, 结果较接近于磁光石榴石薄膜光吸收系数的真值。

## 二、理论分析

介质对通过的光总存在着一定的吸收, 且遵守 Lambert 定律。如图2所示, 设光通过磁光石榴石薄膜中薄层  $dx$  后, 由于散射而减弱的光强为  $-dI$ 。考虑到稀土或 Bi 等元素的掺入, 造成薄膜与衬底之间的晶格失配, 以及制备工艺等因素造成薄膜中散射中心密度的变化,  $-dI$  不仅与入射光强  $I_0$ 、薄层厚度  $dx$  成正比, 还与薄膜厚度  $x$  有关, 因此,

$$-dI = \gamma I_0 x dx$$

比例系数  $\gamma$  称之为散射系数。由上式积分得

$$I = I_0 e^{-\frac{1}{2}\gamma x^2} = I_0 e^{-2\gamma h^2} \quad (2)$$

式中  $h = d/2$  为单面薄膜厚度。

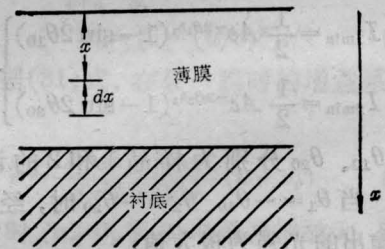


图2 磁光石榴石薄膜中的光散射

根据 Malus 定律, 并计及光损耗, 光束通过图3所示的磁光石榴石薄膜调制器系统后, 输出光强  $I$  为

$$\begin{aligned} I &= I_0 \xi (1 - R_1)^2 (1 - R_2)^2 e^{-2\alpha h} \\ &\quad \times e^{-2\gamma h^2} \cdot e^{-\alpha_s h_s} \cdot \cos^2(\varphi + \theta) \\ &= A e^{-2\beta h} \cdot \cos^2(\varphi + \theta) \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $\xi$  为起、检偏器引入的损耗因子,  $\beta = \alpha + \gamma h$  为薄膜光衰减系数,  $\varphi$  为起、检偏器透光轴之间的夹角,  $\theta$  为磁光调制器的调制角,  $\alpha_s$ 、 $h_s$  分别为衬底的光吸收系数和厚度;

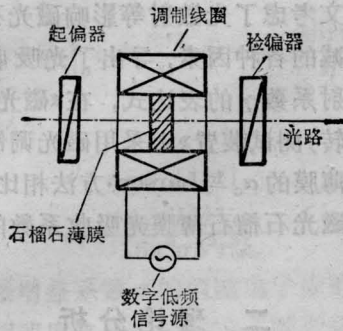


图3 磁光调制器

$$A = I_0 \xi (1 - R_1)^2 (1 - R_2)^2 e^{-\alpha_s h_s}$$

设有两个材料相同、厚度分别为  $2h_1$ 、 $2h_2$  的磁光石榴石薄膜，除生长时间外，其余生长条件完全相同，则两个薄膜样品的  $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  均相同。将这两个薄膜样品先后置入图3的磁光调制器系统，测得的调制光强将分别为

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= A e^{-2\beta_1 h_1} \cos^2(\varphi + \theta_1) \\ I_2 &= A e^{-2\beta_2 h_2} \cos^2(\varphi + \theta_2) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中  $\beta_1 = \alpha + \gamma h_1$ 、 $\beta_2 = \alpha + \gamma h_2$ ， $\theta_1$ 、 $\theta_2$  分别为薄膜调制样品1和2的磁光调制角即交变的磁光旋转角。

令  $\varphi = 45^\circ$ ，当  $\theta_1 = \theta_{10}$ 、 $\theta_2 = \theta_{20}$  时，经磁光调制器输出的光强为极小值，(4)式变为

$$\left. \begin{aligned} I_{1\min} &= \frac{1}{2} A e^{-2\beta_1 h_1} (1 - \sin 2\theta_{10}) \\ I_{2\min} &= \frac{1}{2} A e^{-2\beta_2 h_2} (1 - \sin 2\theta_{20}) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中  $\theta_{10}$ 、 $\theta_{20}$  分别为样品1和2的调制幅度<sup>[3]</sup>。当  $\theta_1 = -\theta_{10}$ 、 $\theta_2 = -\theta_{20}$  时，经磁光调制器输出的光强为极大值，

$$\left. \begin{aligned} I_{1\max} &= \frac{1}{2} A e^{-2\beta_1 h_1} (1 + \sin 2\theta_{10}) \\ I_{2\max} &= \frac{1}{2} A e^{-2\beta_2 h_2} (1 + \sin 2\theta_{20}) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

由(5)、(6)两式可得

$$\frac{I_{1\max} + I_{1\min}}{I_{2\max} + I_{2\min}} = e^{-2(\beta_1 h_1 - \beta_2 h_2)}$$

即

$$\begin{aligned} & \gamma(h_1 + h_2) + \alpha \\ &= \frac{1}{2(h_2 - h_1)} \ln \frac{I_{1\max} + I_{1\min}}{I_{2\max} + I_{2\min}} \quad (7) \end{aligned}$$

推得(7)式时假定了样品1和2的衬底厚度

相等，这与实际情形可能有些出入，但由于  $\alpha_s \ll \alpha$ ，故由衬底厚度不完全相等引入的误差可以忽略不计。由(7)式不难看出，只要实验上测得三个材料相同、厚度不同的薄膜样品的  $I_{\max}$ 、 $I_{\min}$  值，以及三个薄膜样品的厚度，就可以算出这种薄膜材料的  $\alpha$  和  $\gamma$  值。

若光束不经磁光调制器而直接射入石榴石薄膜样品，则经样品输出的光强为

$$I = I_0 (1 - R_1)^2 (1 - R_2)^2 e^{-2h(\alpha + \gamma h)} e^{-\alpha_s h_s}$$

由此得

$$\begin{aligned} \alpha + \gamma h &= \frac{1}{2h} \ln \frac{(1 - R_1)^2}{T} \\ &+ \frac{1}{2h} [\ln(1 - R_2)^2 - h_s \alpha_s] \quad (8) \end{aligned}$$

当  $\alpha$ 、 $\gamma$  等量为已知值时，则根据(8)式可以算出膜系透过率  $T$ 。

由(8)式与通常的 Lambert 定律相比较可知，计及了衬底吸收 ( $\alpha_s$ ) 和薄膜-衬底界面反射 ( $R_2$ ) 等影响后，所得的薄膜光吸收系数  $\alpha$  值要比用通常方法所得的小。

### 三、实 验

将文献[3]所述的直流磁场部分除去，即可作为  $\alpha$ 、 $\gamma$  的测量装置(图4)。

将  $(\text{BiTm})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$  薄膜样品1置于磁光调制器调制线圈中，调整光路，选定调制频率  $f$  (例如 500 Hz) 和调制磁场  $H$  (电流  $i$ )，使起、检偏器透光轴之间的夹角  $\varphi = 45^\circ$ ，在示波器上读出相应的  $I_{1\max}$ 、 $I_{1\min}$  值。

将样品1换成样品2，在入射光强保持不变条件下，测得相应的  $I_{2\max}$ 、 $I_{2\min}$  值。同

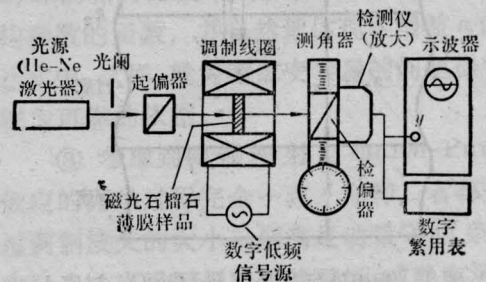


图4 测量装置示意图

表 1

样品编号	单面薄膜厚度 ( $\mu\text{m}$ )	$I_{\text{max}}$ (V)	$I_{\text{min}}$ (V)	$\gamma$ ( $10^4 \text{cm}^{-2}$ )	$\alpha$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$\beta$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$T$ (%)	$\alpha^*$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$T^*$ (%)
1	3.02	4.61	3.87	23.02	372.9	442.4	54.6	550	50.2
2	13.75	1.166	0.498	23.02	372.9	689.4	10.7	692	10.5
3	18.31	0.461	0.143	23.02	372.9	794.4	3.9	862	3.0

理再测出样品 3 的  $I_{3\text{max}}$ 、 $I_{3\text{min}}$  值。把上述数据(见表 1)代入(7)式可得如下三个方程

$$\left. \begin{aligned} \gamma(h_1+h_2)+\alpha &= \frac{1.628}{2(h_2-h_1)} \quad (\text{a}) \\ \gamma(h_1+h_3)+\alpha &= \frac{2.642}{2(h_3-h_1)} \quad (\text{b}) \\ \gamma(h_2+h_3)+\alpha &= \frac{1.013}{2(h_3-h_2)} \quad (\text{c}) \end{aligned} \right\} (9)$$

把三个样品的单面薄膜厚度  $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$  值代入上式,由

(9)(a)、(9)(b)两式联立解得:

$$\gamma_1 = 23.03 \times 10^4 \text{cm}^{-2} \quad \alpha_1 = 372.9 \text{cm}^{-1}$$

9(b)、9(c)两式联立解得:

$$\gamma_2 = 23.02 \times 10^4 \text{cm}^{-2} \quad \alpha_2 = 373.0 \text{cm}^{-1}$$

9(c)、9(a)两式联立解得:

$$\gamma_3 = 23.02 \times 10^4 \text{cm}^{-2} \quad \alpha_3 = 372.9 \text{cm}^{-1}$$

平均值:

$$\gamma = 23.02 \times 10^4 \text{cm}^{-2} \quad \alpha = 372.9 \text{cm}^{-1}$$

由(9)式算得的  $\gamma$ 、 $\alpha$  值以及  $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$  衬底的  $\alpha_s = 0.2 \text{cm}^{-1}$ 、 $h_s = 0.06 \text{cm}$  等值代入(8)式,算出的三个薄膜样品的透过率  $T$  列于表 1。为便于比较,我们用引言中所述的通常测量方法和由 Larsen 给出的简易表达式算得的三个薄膜样品光吸收系数  $\alpha^*$  以及透过率  $T^*$  值亦列于表 1 中。

#### 四、讨 论

1. 用通常方法测得的各个薄膜样品的  $n$ 、 $2h$ 、 $T$  值代入 Larsen 简易表达式,算得的“吸收系数” $\alpha^*$  随磁光石榴石薄膜样品厚度增加而上升,这与实际情形明显不符。实际上, $\alpha^*$  中除了包括薄膜样品的真正吸收系数外,

还包括了散射系数、衬底吸收系数、薄膜-衬底界面反射损耗因子等部分。用磁光调制比较法可以基本上消去上述误差因素,故测得的  $\alpha < \alpha^*$ ,且基本上不随薄膜厚度而变。

2. 由磁光调制比较法得到的薄膜样品透过率  $T$  与直接用分光光度计测得的薄膜样品透过率  $T^*$  相符得较好,这一定程度上说明了磁光调制比较法的可靠性。 $T$  与  $T^*$  稍有差别的原因除了仪器本身导致的测量误差外,一个十分重要的因素是薄膜样品厚度的不均匀。本文所用三个薄膜样品的厚度不均匀度在 5% 左右。

3. 激光源不稳定会对测量结果带来误差。为了保证测量过程中输入光强  $I_0$  始终保持不变,宜采用稳功率激光源。

4. 用通常方法需要测得薄膜折射率  $n$ 、透过率  $T^*$  和厚度  $2h$  三个量后才能计算出  $\alpha^*$  值;而采用磁光调制比较法只需事先测出  $2h$ ,利用现成的《磁光旋转测试装置》测得调制光强的最大值  $I_{\text{max}}$  和最小值  $I_{\text{min}}$ ,即可计算  $\alpha$  值,无需分光光度计等较为昂贵的专用设备,而且测试方法亦较为简单。

5. 磁光调制比较法原则上亦可用于测量其他种类的磁光单晶和薄膜,但不适用于成分不同或成分起伏明显的样品情形。

#### 参 考 文 献

- [1] P. K. Larsen, J. M. Robertson; *J. Appl. Phys.*, 1974, **45**, No. 7, 2867.
- [2] 何钰泉、关铁梁;《磁性材料与器件》, 1984, **15**, No. 1, 57.
- [3] 刘公强、刘湘林;《光学学报》, 1984, **4**, No. 7, 588.