

# MnBi 磁性多层膜磁光科尔效应的数值模拟<sup>\*</sup>

林应斌<sup>1)</sup> 赖 恒<sup>1)</sup> 黄志高<sup>1,2)</sup> 都有为<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 福建师范大学物理系, 激光所, 福州 350007)

<sup>2)</sup> 南京大学固体微结构国家重点实验室, 南京 210093)

(2003 年 2 月 17 日收到, 2003 年 5 月 21 日收到修改稿)

基于各向异性的平面电磁波传输理论和  $4 \times 4$  矩阵法, 计算了 MnBi,  $\text{Mn}_{0.53}\text{Bi}_{0.47}$ ,  $\text{Mn}_{0.52}\text{Bi}_{0.44}\text{Sb}_{0.04}$  磁性多层膜系列的磁光科尔旋转角、椭圆率随波长、入射角、磁性层厚度变化曲线. 计算结果表明, 模拟的科尔旋转角、椭圆率随波长变化规律与实验结果吻合很好. 在一定波长的垂直入射下, 模拟的科尔旋转角、椭圆率随磁性层厚度变化曲线出现科尔谱极大. 在磁性层厚度一定的情况下, 当入射光以某一角度入射时, 模拟的科尔旋转角、椭圆率随入射角变化曲线呈现极大峰. 这些结果对材料设计具有重要的意义.

关键词:  $4 \times 4$  矩阵法, 磁性多层膜, 磁光科尔谱, 介电张量

PACC: 7540M, 7820L, 7550S

## 1. 引 言

多年来, 高密度的磁光记录材料一直是人们重要的研究对象. 磁性材料的磁光科尔效应在理论和实验方面都引起人们很大的兴趣<sup>[1-8, 24, 25]</sup>. Co/Pt 磁性多层膜是重要的磁光记录材料, 其科尔谱的峰值出现在波长为 320nm, 旋转角约等于  $0.54^{\circ}$ <sup>[8]</sup>. 但是作为下一代磁记录材料的有力竞争者, MnBi 多层膜系列同样也吸引着许多人的目光<sup>[1, 9-14]</sup>. 实验发现  $\text{Mn}_{0.53}\text{Bi}_{0.47}$  在波长为 580nm 处的科尔旋转角等于  $1.65^{\circ}$ . 在  $\lambda = 650\text{nm}$  情况下 MnBi 的科尔旋转角等于  $3.2^{\circ}$ <sup>[1, 2]</sup>.  $4 \times 4$  矩阵法是 Billard<sup>[15]</sup>, Teitler 和 Henvis<sup>[16]</sup>, Berreman 和 Scheffer<sup>[17]</sup> 于上世纪 70—80 年代提出来的, 主要用来研究各向异性分层平面结构且低对称媒质对倾斜入射偏振光的反射和透射的问题. 已有许多工作利用该理论来解释磁性多层膜的磁光科尔效应并取得了好的效果<sup>[18, 19]</sup>. 但迄今为止, 对 MnBi 多层膜材料系列磁光效应的理论研究还很少见. 本文应用  $4 \times 4$  矩阵法计算了 MnBi,  $\text{Mn}_{0.53}\text{Bi}_{0.47}$ ,  $\text{Mn}_{0.52}\text{Bi}_{0.44}\text{Sb}_{0.04}$  磁性多层膜的科尔谱随入射光

波长、入射角、磁性层厚度变化, 模拟结果很好地解释了实验测量结果, 同时得到了一些对材料设计有价值的结果.

## 2. 理 论

基于各向异性媒质中平面电磁波的传输理论<sup>[20]</sup>, 我们可以用  $4 \times 4$  矩阵法计算出磁性多层膜的磁光科尔旋转角和椭圆率. 首先建立笛卡尔坐标系, 其中 XY 平面平行于多层膜的界面而 Z 轴垂直于多层膜的界面. 磁光科尔效应中反射光的偏振状态和介质的折射率与介电张量有直接的关系. 假定多层膜系统中每一层介质都是均匀的, 那么在每一层中的电场矢量可以表示为  $E = |E| \exp[i(k_x x + k_y y + k_z z - \omega t)]$ <sup>[21]</sup>, 其中  $|E|$  是电场矢量的振幅,  $\omega$  是入射光的角频率,  $t$  代表时间,  $k_x, k_y, k_z$  分别是波矢  $k$  的各个分量. 由于在 XY 平面上各层介质是各向同性的, 那么就可以认为在多层膜系统中  $k_x, k_y$  近似为不变的常数.

由磁光的理论知识, 可以得到如下的基本矩阵方程

<sup>\*</sup> 教育部高等学校骨干教师资助计划, 福建省自然科学基金和创新人才基金(批准号: E0010022, 2000E146 和 K3-070), 国家 973 项目(批准号: 1999064508) 资助的课题.

$$\begin{bmatrix} \omega^2 \mu \epsilon_{xx} - k_y^2 - k_z^2 & \omega^2 \mu \epsilon_{xy} + k_x k_y & \omega^2 \mu \epsilon_{xz} + k_x k_z \\ \omega^2 \mu \epsilon_{yx} + k_x k_y & \omega^2 \mu \epsilon_{yy} - k_x^2 - k_z^2 & \omega^2 \mu \epsilon_{yz} + k_y k_z \\ \omega^2 \mu \epsilon_{zx} + k_x k_z & \omega^2 \mu \epsilon_{zy} + k_y k_z & \omega^2 \mu \epsilon_{zz} - k_x^2 - k_y^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} = 0, \quad (1)$$

式中 电场矢量  $E = E_x \hat{x} + E_y \hat{y} + E_z \hat{z}$ , 波矢  $k = k_x \hat{x} + k_y \hat{y} + k_z \hat{z}$ .

在可见光波长范围内,介质的磁导率近似等于 1.对于光学各向同性且磁矩垂直于表面的磁光介质,介电张量可以写为

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & 0 \\ -\epsilon_{xy} & \epsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中  $\epsilon_{xx} = \tilde{n}^2$ ,  $\epsilon_{xy} = -i\tilde{Q}\epsilon_{xx}$ ,  $\tilde{n} = n + ik$ , 其中  $n, k$  分别是介质的折射率和消光系数,  $\tilde{Q} = Q_1 + iQ_2$  是磁性介质的磁光系数,对于非磁性介质,非对角元  $\epsilon_{xy}$  等于零,所以介电张量表征了磁性介质的磁光属性并直接影响到磁光科尔效应的旋转角和椭圆率.

引入微分传播矩阵  $\Delta$ ,它的各个微分传播矩阵元可以由介电张量  $\tilde{\epsilon}$ 、磁导率张量  $\tilde{\mu}$ 和旋光率张量  $\tilde{\rho}$ 求出<sup>[22]</sup>.当入射光垂直多层膜膜面( $z$ 轴)传播时,

在  $z$  方向上的波动方程是

$$\frac{\partial}{\partial z} \psi = -i\omega \Delta \psi, \quad (3)$$

其中广义场矢量

$$\psi = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ H_x \\ H_y \end{bmatrix}.$$

在  $\Delta$  是恒定与  $z$  无关的情况下,方程(3)具有四个特殊的平面波解,其表达式为

$$\psi(z) = \psi_\sigma(0) e^{-ik_\sigma z} \quad (\sigma = 1, 2, 3 \text{ 和 } 4), \quad (4)$$

式中  $k_\sigma$  是平面波传播矢量平行于  $z$  轴的分量,即每个平面波相应的本征值,它可以由下列的矩阵-本征方程求出:

$$[\omega \Delta - k_z I] \psi = 0. \quad (5)$$

每一层媒质中的一般动力学矩阵可以写成<sup>[18]</sup>

$$D(N) = \begin{bmatrix} E_{1x}(N) & E_{2x}(N) & E_{3x}(N) & E_{4x}(N) \\ E_{1y}(N) & E_{2y}(N) & E_{3y}(N) & E_{4y}(N) \\ H_{1x}(N) & H_{2x}(N) & H_{3x}(N) & H_{4x}(N) \\ H_{1y}(N) & H_{2y}(N) & H_{3y}(N) & H_{4y}(N) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

该矩阵是由(5)式的四个本征矢量排成四列构成, $N$ 代表媒质所在的层数.

因此,第  $N$  层的传播矩阵  $L(h)$  为

$$L(h) = D(N) \times P(N) \times D^{-1}(N),$$

其中传播矩阵  $P(N)$  是一对角矩阵,其矩阵元由本征值  $K_\sigma$  给出,即<sup>[18]</sup>

$$P(N) = \begin{bmatrix} \exp[-ik_{z1}(N)h_N] & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \exp[-ik_{z2}(N)h_N] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \exp[-ik_{z3}(N)h_N] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \exp[-ik_{z4}(N)h_N] \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中  $h_N$  是第  $N$  层媒质的厚度,  $k_{z1}(N) \times h_N$  表示本征值为  $k_{z1}$  的平面波通过厚度为  $h_N$  的薄膜时相位的变化.

在真空情况下,整个系统的传输矩阵  $L$  可以表示成<sup>[18]</sup>

$$L = D^{-1}(0) \times D(1) \times P(1) \times D^{-1}(1)$$

$$\times D(2) \times P(2) \dots D(N) P(N), \quad (8)$$

其中  $D(0)$  是真空中动力学矩阵.

系统的反射矩阵可以表示为<sup>[18, 23]</sup>

$$R = \begin{bmatrix} r_{xx} & r_{xy} \\ r_{yx} & r_{yy} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

反射矩阵中各矩阵元  $r_{xx}, r_{xy}, r_{yx}, r_{yy}$  可以表示成<sup>[18]</sup>

$$r_{xx} = \frac{L_{21}L_{33} - L_{23}L_{31}}{L_{11}L_{33} - L_{13}L_{31}}, \quad (10)$$

$$r_{xy} = \frac{L_{41}L_{33} - L_{43}L_{31}}{L_{11}L_{33} - L_{13}L_{31}}, \quad (11)$$

$$r_{yx} = \frac{L_{11}L_{23} - L_{21}L_{13}}{L_{11}L_{33} - L_{13}L_{31}}, \quad (12)$$

$$r_{yy} = \frac{L_{11}L_{43} - L_{41}L_{13}}{L_{11}L_{33} - L_{13}L_{31}}. \quad (13)$$

反射矩阵中的各个矩阵元决定了磁光系统的磁光科尔旋转角和椭圆率的大小<sup>[18]</sup>,其中科尔旋转角

$$\theta_x = \text{Re}(r_{yx}/r_{xx}), \quad (14)$$

$$\theta_y = -\text{Re}(r_{xy}/r_{yy}). \quad (15)$$

科尔椭圆率

$$\eta_x = \text{Im}(r_{yx}/r_{xx}), \quad (16)$$

$$\eta_y = \text{Im}(r_{xy}/r_{yy}). \quad (17)$$

对于一般的磁光多层膜系统,反射矩阵中各矩阵元通常是复数.

### 3. 模拟结果与讨论

$4 \times 4$  矩阵法一般被用来解平面波在各向同性

或各向异性中的传播问题的,但是目前它已经广泛用来计算磁光系统相关的科尔和法拉第旋转.大量的实验和理论研究表明,对于一个光散射系统,它的反射率、科尔旋转角、科尔椭圆率、法拉第旋转角和法拉第椭圆率都是入射角、入射光的波长及媒质层厚度等物理量的函数.本文选取样品 SiO(237nm)/MnBi(50nm)/Glass(0.21mm)(简称 MnBi), SiO(65nm)/Mn<sub>0.53</sub>Bi<sub>0.47</sub>(75nm)/SiO(1nm)/Glass(1mm)(简称 Mn<sub>0.53</sub>Bi<sub>0.47</sub>), SiO(95nm)/Mn<sub>0.52</sub>Bi<sub>0.44</sub>Sb<sub>0.44</sub>(70nm)/SiO(1nm)/Glass(1mm)(简称 Mn<sub>0.52</sub>Bi<sub>0.44</sub>Sb<sub>0.44</sub>)作为研究对象,应用  $4 \times 4$  矩阵法计算样品的科尔旋转角和椭圆率随入射光波长变化.假定在室温下探测光垂直入射在样品上,而且作用在样品上的外加磁场足够强,使得磁性媒质的磁化强度的方向垂直于磁性层表面.由于磁光科尔旋转角、椭圆率的大小主要是由媒质的介电张量等因素决定的,所以掌握多层膜系统中各个媒质在不同波长下的介电张量  $\epsilon$ 、磁导率张量  $\mu$  和旋光率张量  $\rho$  的具体值对我们的模拟工作尤为重要.这里不考虑媒质的旋光性质,即  $\rho = 0$ ,相关媒质的介电张量或折射率列在表 1 和表 2 中<sup>[12]</sup>(表 2 的误差不超过 5%).

表 1 多层膜 MnBi 在不同波长情况下媒质的介电张量元和折射率

波长/nm	SiO(237nm)		MnBi(50nm)		Glass(0.21mm)
	$n$	$k$	$\epsilon_{xx}$	$\epsilon_{xy}$	$n$
360	2.062	0.257	-1.64 + i4.10	-0.288 - i0.217	1.537
400	2.006	0.130	-2.89 + i6.64	-0.439 - i0.228	1.531
450	1.989	0.034	-1.78 + i10.44	-0.552 - i0.186	1.525
500	1.937	0.018	-0.19 + i12.85	-0.680 - i0.128	1.521
550	1.905	0.015	0.56 + i13.46	-0.876 - i0.071	1.519
600	1.885	0.000	0.02 + i14.93	-1.137 + i0.003	1.516
633	1.835	0.000	0.74 + i14.09	-1.332 + i0.091	1.515
650	1.835	0.002	0.56 + i14.24	-1.409 + i0.145	1.515
700	1.825	0.000	-0.07 + i15.13	-1.581 + i0.443	1.513
750	1.831	0.000	0.29 + i17.28	-1.489 + i1.017	1.512
780	1.840	0.000	1.91 + i19.40	-1.218 + i1.557	1.511
820	1.861	0.000	7.94 + i20.60	-0.490 + i2.588	1.511
830	1.876	0.000	9.75 + i21.44	-0.226 + i2.912	1.510
840	1.884	0.000	12.00 + i21.46	0.075 + i3.266	1.510
860	1.885	0.000	12.08 + 21.79	0.801 + i3.667	1.510

表 2 多层膜  $\text{Mn}_{0.53}\text{Bi}_{0.47}$  和  $\text{Mn}_{0.52}\text{Bi}_{0.44}\text{Sb}_{0.04}$  在不同波长情况下媒质的介电张量元

波长/nm	$\text{Mn}_{0.53}\text{Bi}_{0.47}$		$\text{Mn}_{0.52}\text{Bi}_{0.44}\text{Sb}_{0.04}$		SiO	
	$\epsilon_{xx}$	$\epsilon_{xy}$	$\epsilon_{xx}$	$\epsilon_{xy}$	$n$	$k$
360	0.01 + i2.65	-0.04 - i0.09	-1.80 + i4.03	-0.09 - i0.19	1.735	0.109
400	-0.10 + i3.19	-0.07 - i0.09	-0.84 + i4.22	-0.10 - i0.11	1.712	0.053
450	-0.58 + i4.03	-0.09 - i0.10	-0.16 + i4.71	-0.13 - i0.08	1.694	0.025
500	-0.86 + i5.97	-0.15 - i0.12	-0.19 + i6.21	-0.18 - i0.09	1.719	0.014
550	-1.37 + i7.53	-0.23 - i0.14	-1.26 + i7.66	-0.29 - i0.12	1.746	0.013
600	-2.12 + i9.52	-0.34 - i0.13	-2.70 + i6.71	-0.30 - i0.13	1.788	0.010
633	-2.75 + i10.6	-0.40 - i0.11	-4.00 + i10.5	-0.54 - i0.12	1.805	0.007
650	-2.61 + i10.9	-0.44 - i0.07	-3.19 + i10.9	-0.58 - i0.03	1.807	0.0
700	-4.09 + i12.2	-0.57 - i0.06	-3.81 + i12.2	-0.70 + i0.12	1.815	0.0
750	-0.89 + i16.5	-0.74 + i0.35	-5.01 + i13.2	-0.843 + i0.22	1.835	0.0
780	0.48 + i16.0	-0.67 + i0.52	-5.30 + i14.5	-0.92 + i0.34	1.814	0.0
820	1.38 + i15.9	-0.55 + i0.63	-1.51 + i13.6	-0.61 + i0.65	1.827	0.0
840	3.71 + i17.5	-0.55 + i0.96			1.830	0.0
860	3.91 + i17.1	-0.46 + i1.02			1.835	0.0

### 3.1. MnBi 系列多层膜的科尔旋转角和椭圆率随波长变化规律的数值模拟

根据方程(5)–(17)并结合表 1 中所给定的数据可以计算出该多层膜系统的磁光科尔旋转角和椭圆率.图 1(a)和(b)分别给出了 MnBi 多层膜在零入射角情况下系统的科尔旋转角和椭圆率随入射光波长变化的实验曲线和模拟曲线.从图 1 可以看出,用  $4 \times 4$  矩阵法模拟曲线与实验测量结果符合得很好.

当入射光的波长  $\lambda$  从 360nm 变化到 860nm 的过程中,系统科尔旋转角  $\theta$  的模拟曲线在  $\lambda = 400\text{nm}$  和  $\lambda = 633\text{nm}$  两处出现极值, $\lambda = 400\text{nm}$  处出现正的极大值,而在  $\lambda = 633\text{nm}$  处出现负的极大值  $\theta_{\max}$ .但是对于椭圆率  $\eta$  曲线,它则在三个地方出现极值,在  $\lambda = 400\text{nm}$  处出现负的极大值,而在  $\lambda = 450\text{nm}$  处和  $\lambda = 633\text{nm}$  处出现了正的极大值.

图 2 给出了  $\text{Mn}_{0.53}\text{Bi}_{0.47}$  多层膜的科尔谱随入射

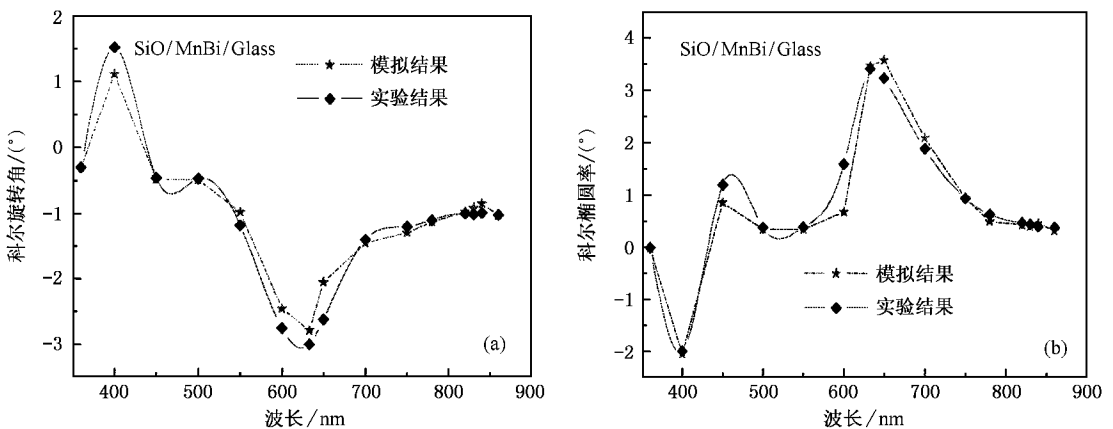


图 1 MnBi 多层膜的科尔旋转角和椭圆率随入射光波长变化

光波长的变化关系.从图 2(a)可以看出模拟的科尔旋转角曲线与实验曲线符合得很好,它们的变化趋势基本一致,科尔旋转角的极值出现在波长  $\lambda =$

600—700nm 范围内.对于科尔椭圆率,虽然在中波段计算的结果与实验测量的结果有一定的差距,但是两者随波长变化的总趋势基本上是一致的,结合

模拟曲线和计算曲线,可以肯定椭圆率的最大值  $\eta_{max}$  必定出现在 550—700nm 的波长范围内.当然,从图中也看到模拟和实验结果之间在中间波段存在一定的偏差,它可能来源于系统的表面和界面效应,进一步的研究还在进行中.

结合表 2 的数据并应用  $4 \times 4$  矩阵法就可以计算出多层膜的极向科尔旋转角和椭圆率.图 3 给出了  $Mn_{0.52}Bi_{0.44}Sb_{0.04}$  多层膜相应的模拟曲线和实验结果.从科尔旋转角变化曲线  $\chi$  (a) 可以发现,用  $4 \times 4$

矩阵法模拟的曲线和实验测量结果符合得很好,在可见光范围内,二者的科尔旋转角  $\theta$  的大小均随入射光波长  $\lambda$  的增加而单调地减小.而从科尔椭圆率  $\eta$  随波长的变化关系曲线,可以明显看到模拟曲线和实验曲线具有相同的变化趋势,当波长  $\lambda$  从 360nm 增大到 600nm 时,椭圆率的大小呈单调减小的趋势,而且两条曲线符合得很好;当波长  $\lambda$  继续增大到 860nm 时,  $\eta$  朝负方向单调增加,所不同的是,模拟的曲线增大的速率更大.

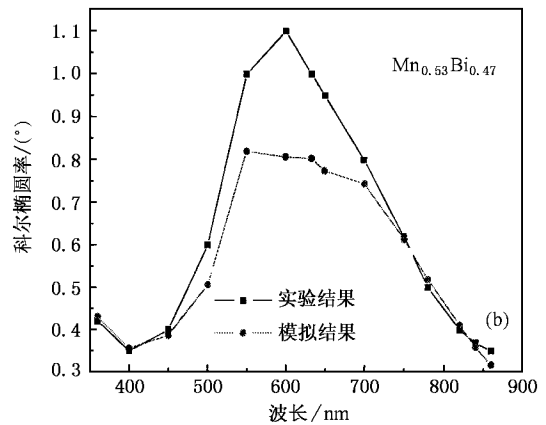
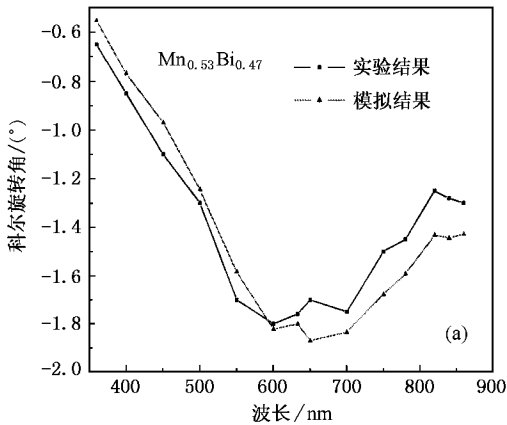


图 2  $Mn_{0.53}Bi_{0.47}$  多层膜的科尔谱随入射光波长变化的曲线

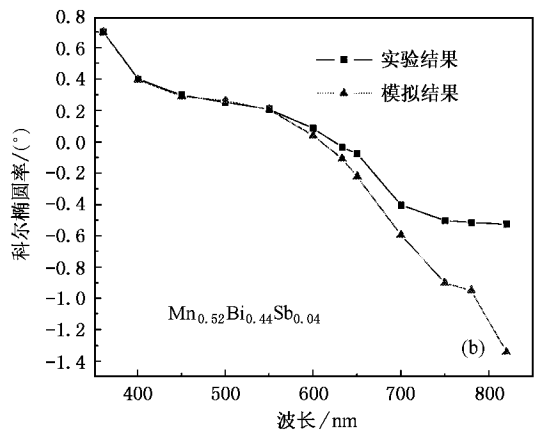
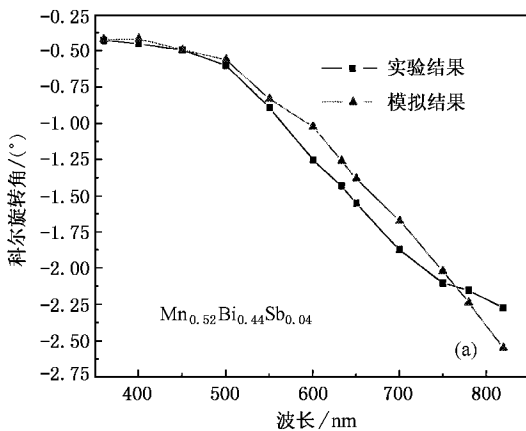


图 3  $Mn_{0.52}Bi_{0.44}Sb_{0.04}$  多层膜科尔旋转角和椭圆率随入射光波长变化

### 3.2. MnBi 系列多层膜的科尔旋转角和椭圆率随磁性层厚度变化规律的数值模拟

下面应用矩阵法模拟科尔效应随磁性层厚度和入射角变化的关系曲线.尽管这方面的计算还很少见,但对实验设计却很有意义.假设在波长  $\lambda = 633nm$  的光垂直入射时,各个媒质的折射率和介

电张量的大小不会随磁性层厚度  $h$  的变化而发生改变.图 4 (a) (b) (c) 分别给出了  $MnBi$ ,  $Mn_{0.53}Bi_{0.47}$  和  $Mn_{0.52}Bi_{0.44}Sb_{0.04}$  多层膜在零入射角下科尔谱随磁性层厚度变化的实验和模拟曲线.从图中可以看到三个样品的科尔谱随磁性层厚度变化的共同特征是:科尔旋转角和椭圆率的极值都出现在厚度比较小的地方,并且当磁性层达到一定厚度时,科尔旋转

角和椭圆率都开始饱和.但是对于不同的样品,科尔谱随磁性层厚度的变化关系有各自的特点.对于 MnBi 多层膜,当磁性层厚度  $h = 11\text{nm}$  时,科尔旋转角  $\theta$  出现最大值,  $\theta_{\max} = 8.79^\circ$ .科尔椭圆率的极大值则出现在  $h = 19\text{nm}$  处,其大小为  $8.19^\circ$ .当磁性层厚度大于  $85\text{nm}$  时,科尔旋转角趋于饱和.对于  $\text{Mn}_{0.53}\text{Bi}_{0.47}$  多层膜,当磁性层厚度  $h = 12\text{nm}$  时,科尔旋转角  $\theta$  出现最大值,  $\theta_{\max} = 7.48^\circ$ ,  $h \approx 20\text{nm}$  时,旋转角  $\theta \approx 0$ .当  $h \geq 85\text{nm}$  时,科尔旋转角趋于饱和.科尔椭圆率的极大值则出现在  $h = 16\text{nm}$  处,其大小为  $6.35^\circ$ .当  $h > 50\text{nm}$  时,科尔椭圆率  $\eta$  开始趋于饱和.对于  $\text{Mn}_{0.52}\text{Bi}_{0.44}\text{Sb}_{0.04}$  多层膜,当厚度  $h = 14\text{nm}$  时,科尔旋转角  $\theta$  出现负的最大值,  $\theta_{\max} = -2.38^\circ$ .当磁性层厚度大于  $14\text{nm}$  时,  $\theta$  的大小随着厚度  $h$  的增加而下降,  $h \approx 50\text{nm}$  时,科尔旋转角趋于饱和.对科尔椭圆率,当磁性层厚度  $h$  从  $10\text{nm}$  增加到  $15\text{nm}$  时,椭圆率由负的最大值迅速减小至  $0^\circ$ ;当其厚度继续增大到  $27\text{nm}$  时,椭圆率达到正的最大值  $\eta_{\max} \approx 0.49^\circ$ ,  $h$  继续增加时  $\eta$  值缓慢减小,并在  $h \approx 80\text{nm}$  时开始饱和.

### 3.3. MnBi 系列多层膜的科尔旋转角和椭圆率随入射角变化规律的数值模拟

假定在模拟过程中,入射光的波长  $\lambda (= 633\text{nm})$  和磁性层的厚度  $h$  都不会发生变化.图 5(a)(b), (c)(d)(e)(f) 分别给出了三种磁性膜的科尔旋转角和椭圆率随入射角变化的关系曲线.对 MnBi 多层膜,其磁光科尔旋转角的  $X$  分量  $\theta_x$  随入射角  $\alpha$  的增大而减小,  $Y$  分量  $\theta_y$  先减小后增大,当入射角  $\alpha = 48^\circ$  时,  $\theta_y$  由负的极大值减小到  $0^\circ$ .当入射角  $\alpha$  从  $0^\circ$  增大到  $70^\circ$  时,总的科尔旋转角  $\theta = \sqrt{\theta_x^2 + \theta_y^2}$  值由最大值  $3.94^\circ$  逐渐减小到其最小值  $0.8^\circ$ ,  $\alpha$  继续增大时,  $\theta$  的值开始单调增加.科尔椭圆率的  $X$  分量  $\eta_x$  的大小随入射角  $\alpha$  的增大而减小,当  $\alpha = 28^\circ$  时,  $Y$  分量  $\eta_y$  有最大值  $\eta_{y\max} \approx 4.07^\circ$ .  $\alpha$  继续增大时,  $\eta_y$  值开始减小;当  $\alpha \approx 70^\circ$  时,  $\eta_y$  有最小值.当入射角  $\alpha$  从  $0^\circ$  增大到  $19^\circ$  时,科尔椭圆率  $\eta = \sqrt{\eta_x^2 + \eta_y^2}$  值缓慢地增加到最大值  $5.05^\circ$ ,然后当  $\alpha$  继续增大时,  $\eta$  值则单调地减小,当入射角  $\alpha \approx 60^\circ$  时,科尔椭圆率开始饱和.对于  $\text{Mn}_{0.53}\text{Bi}_{0.47}$  多层膜,  $\theta_x$  的大小随入射角  $\alpha$  的增大而缓慢地减小,  $\theta_y$  的极值分别出现在  $\alpha = 40^\circ$  和

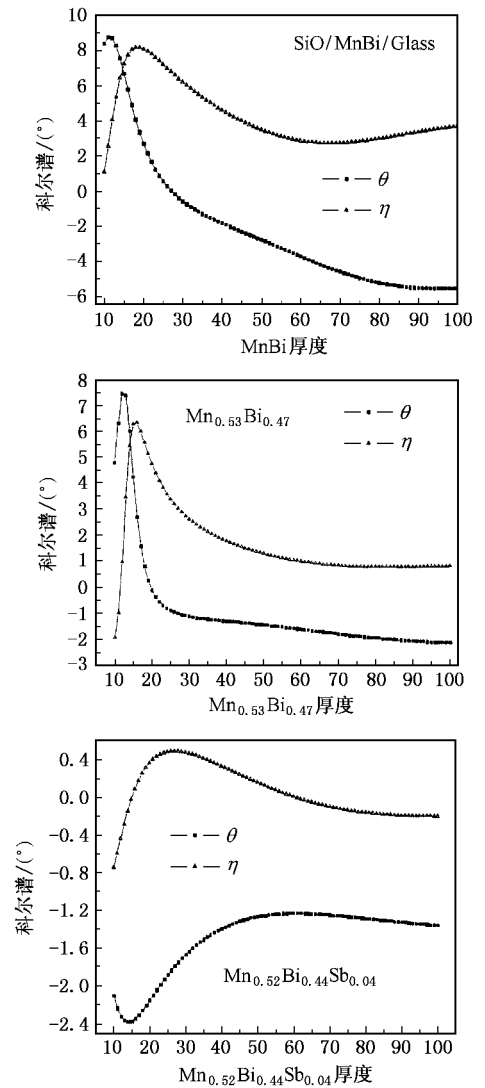


图4 磁性多层膜的科尔谱随磁性层厚度的变化曲线  
(a) MnBi (b)  $\text{Mn}_{0.53}\text{Bi}_{0.47}$  (c)  $\text{Mn}_{0.52}\text{Bi}_{0.44}\text{Sb}_{0.04}$

$89^\circ$ 处,极值分别是  $\theta_{y\max} \approx -2.10^\circ$  与  $\theta_{y\max} \approx 2.67^\circ$ ,但  $\theta$  最大值  $\theta_{\max} = 2.67^\circ$  出现在  $\alpha \approx 89^\circ$ ;  $\eta_x$  的大小随  $\alpha$  的增大而缓慢地减小,当  $\alpha \approx 65^\circ$  时,  $\eta_x \approx 0^\circ$ ,  $\eta_y$  却增大到最大值  $\eta_{y\max} \approx 4.00^\circ$ .科尔椭圆率  $\eta$  变化趋势和  $\eta_y$  的变化趋势基本一致.对  $\text{Mn}_{0.52}\text{Bi}_{0.44}\text{Sb}_{0.04}$  磁性多层膜,  $\theta_x$  随  $\alpha$  的增大而减小,  $\theta_y$  的两个极值  $\theta_{y\max} \approx -2.76^\circ$  和  $\theta_{y\max} \approx 1.98^\circ$  分别出现在  $\alpha = 65^\circ$  和  $\alpha = 89^\circ$  处.对于椭圆率,  $\alpha = 62^\circ$  时,  $\eta_x$  出现负的最大值  $\eta_{x\max} \approx -0.24^\circ$ ;当  $\alpha = 80^\circ$  时,  $\eta_y$  有负的最大值  $\eta_{y\max} \approx -5.25^\circ$ .  $\theta$  最大值  $2.82^\circ$  出现在  $\alpha = 63^\circ$  处,最小值  $\theta_{\min} = 0.13^\circ$  出现在  $\alpha = 81^\circ$  处;入射角  $\alpha = 81^\circ$  时,  $\eta$  达到其最大值  $5.25^\circ$ .

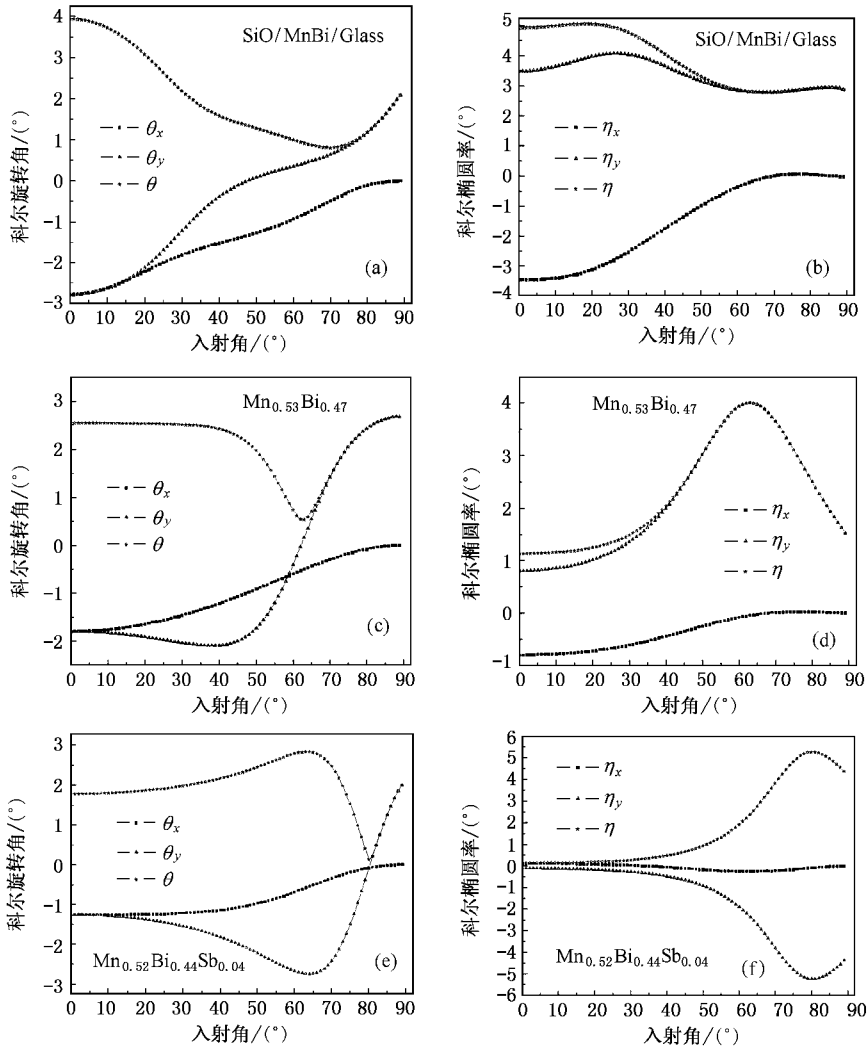


图5  $\text{MnBi}$ ,  $\text{Mn}_{0.53}\text{Bi}_{0.47}$ ,  $\text{Mn}_{0.52}\text{Bi}_{0.44}\text{Sb}_{0.04}$ 多层膜的科尔谱随入射角度的变化曲线

## 4. 结 论

应用  $4 \times 4$  矩阵法, 分别模拟了磁光科尔谱随波长、磁性层厚度和入射角之间的关系曲线. 模拟结果表明, 对于所研究的样品系列  $\text{MnBi}$ ,  $\text{Mn}_{0.53}\text{Bi}_{0.47}$ ,  $\text{Mn}_{0.52}\text{Bi}_{0.44}\text{Sb}_{0.04}$ , 所模拟的科尔谱随波长变化的曲线很好地解释了实验结果. 而磁光科尔谱随磁性层厚度和入射角的模拟结果表明, 对于  $\text{MnBi}$  系统, 当  $\text{MnBi}$  的厚度  $h = 11\text{nm}$  时, 科尔旋转角出现极大值  $8.79^\circ$ , 而科尔椭圆率的极大值则出现在  $h = 19\text{nm}$

处, 其大小为  $8.19^\circ$ , 当入射角  $\alpha = 0^\circ$  时,  $\theta_{\max} = 3.94^\circ$ ,  $\alpha = 19^\circ$  时,  $\eta_{\max} = 5.05^\circ$ ; 对于  $\text{Mn}_{0.53}\text{Bi}_{0.47}$  系统, 科尔旋转角的最大值出现在磁性层厚度  $h = 12\text{nm}$  的情况下, 最大值等于  $7.48^\circ$ , 而当  $h = 16\text{nm}$  时, 科尔椭圆率有最大值, 最大值是  $6.35^\circ$ , 当入射角  $\alpha = 89^\circ$  时,  $\theta_{\max} = 2.67^\circ$ ,  $\alpha = 63^\circ$  时,  $\eta_{\max} = 4.0^\circ$ ; 对于  $\text{Mn}_{0.52}\text{Bi}_{0.44}\text{Sb}_{0.04}$  系统, 科尔旋转角的最大值出现在磁性层厚度  $h = 14\text{nm}$  的情况下, 最大值等于  $2.38^\circ$ , 而当  $h = 27\text{nm}$  时, 科尔椭圆率有最大值, 最大值是  $0.49^\circ$ , 当入射角  $\alpha = 63^\circ$  时,  $\theta_{\max} = 2.82^\circ$ ,  $\alpha = 81^\circ$  时,  $\eta_{\max} = 5.25^\circ$ .

- [ 1 ] Celinski Z and Zheng Y 1996 *J. Appl. Phys.* **79**( 8 )6200
- [ 2 ] Hong Fu *et al* 1995 *J. Appl. Phys.* **78**( 6 )4076
- [ 3 ] Yamaguchi A and Iwata S *et al* 1993 *J. Magn. Magn. Mater.* **121** 542
- [ 4 ] Visnovsky S , Lopusnik R *et al* 1999 *J. Magn. Magn. Mater.* **198 – 199** 480
- [ 5 ] Nakada M and Okada M 1994 *IEEE Trans. On Magn.* **30** 4431
- [ 6 ] Dig Q and Uchiyama S 1996 *Phys. Rev. B* **53** 3327
- [ 7 ] Shang C H and Wang Y J 1997 *J. Chin. Electr. Microsc.* **16**( 4 ) 413
- [ 8 ] Atkinson R *et al* 1996 *J. Magn. Magn. Mater.* **162** 131
- [ 9 ] Rudiger U , Kohler J *et al* 1999 *J. Magn. Magn. Mater.* **198 – 199** 131
- [ 10 ] Di G Q , Iwata S 1992 *J. Magn. Magn. Mater.* **104 – 107** 1023
- [ 11 ] Di G Q , Iwata S 1994 *J. Magn. Magn. Mater.* **131** 242
- [ 12 ] Oppeneer P M , Antonov V N *et al* 1996 *J. Appl. Phys.* **80**( 2 ) 1099
- [ 13 ] Shang C H and Wang Y J 1997 *J. Appl. Phys.* **81**( 8 ) 5662
- [ 14 ] Shen J X , Kirby R D and Sellmyer D J 1991 *J. Appl. Phys.* **69** ( 8 )5984
- [ 15 ] Billard J 1966 Thesis , University of Paris
- [ 16 ] Teitler S and Hennis B 1970 *J. Opt. Soc. Am.* **60** 830
- [ 17 ] Berreman D W and Scheffer T J 1970 *Phys. Rev. Lett.* **25** 577
- [ 18 ] Heim K R and Scheinfein M R 1996 *J. Magn. Magn. Mater.* **154** 141
- [ 19 ] Murray Hill 1972 *J. Opt. Soc. Am.* **62** 502
- [ 20 ] Yariv A and Yeh P 1984 *Optical waves in crystals*( Wiley , New York )
- [ 21 ] Heim K R and Scheinfein M R 1996 *J. Magn. Magn. Mater.* **154** 141
- [ 22 ] Berreman D W 1971 *J. Opt. Soc. Am.* **62** 502
- [ 23 ] Oppeneer P M , Kraft T , Schrig H E 1995 *J. Magn. Magn. Mater.* **148** 298
- [ 24 ] Zhou Q C *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1639 [ in Chinese ] 周青春等 2002 物理学报 **51** 1639 ]
- [ 25 ] Wei J S *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1073 [ in Chinese ] 魏劲松等 2001 物理学报 **50** 1073 ]

## Numerical calculation of Kerr spectra for MnBi magnetic multilayered films \*

Lin Ying-Bin<sup>1)</sup> Lai Heng<sup>1)</sup> Huang Zhi-Gao<sup>1,2)</sup> Du You-Wei<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Department of Physics and Institute of Laser , Fujian Normal University , Fuzhou 350007 , China )

<sup>2)</sup> National Laboratory of Solid State Microstructures , Nanjing University , Nanjing 210093 , China )

( Received 17 February 2003 ; revised manuscript received 21 May 2003 )

### Abstract

Based on the theory of propagating electromagnetic plane waves in homogenous anisotropic media and  $4 \times 4$  matrix method , the Kerr spectra for the MnBi multilayered films as a function of wavelength , incident angle and layer number are simulated. It is found that the calculated Kerr spectra as a function of wavelength are in good agreement with the experimental ones for MnBi ,  $Mn_{0.53}Bi_{0.47}$  ,  $Mn_{0.52}Bi_{0.44}Sb_{0.04}$  . In addition , the Kerr spectra as a function of incident angle and layer number for the MnBi multilayered films are simulated. The calculated results indicate that the magnetic layer number and incident angle greatly affect the Kerr spectra. A maximum Kerr rotation exists at some thickness of the magnetic film as the wavelength of the incident light is normal. Also , a maximum rotation is found in the simulated Kerr rotation as a function of incident angle at a fixed thickness of magnetic layer. These simulated results is important for the design of the materials.

**Keywords :**  $4 \times 4$  matrix , magnetic multiplayer , magneto-optical Kerr rotation , dielectric tensor

**PACC :** 7540M , 7820L , 7550S

\* Project supported by the and the Foundation for University Key Teacher by the Ministry of Education , the NSF of Fujian Province ( Grant Nos. E0010022 , 2000E146 and K3 – 070 ) National Key Project for Basic Research of China ( Grants No. G1999064508 ) , .