



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113916797 B

(45) 授权公告日 2022.08.02

(21) 申请号 202111162313.3

(22) 申请日 2021.09.30

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 113916797 A

(43) 申请公布日 2022.01.11

(73) 专利权人 华中科技大学

地址 430074 湖北省武汉市洪山区珞喻路1037号

(72) 发明人 刘世元 刘佳敏 江浩 龚雯棋

(74) 专利代理机构 华中科技大学专利中心

42201

专利代理师 夏倩 李智

(51) Int. Cl.

G01N 21/21 (2006.01)

G01N 21/01 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 110333191 A, 2019.10.15

CN 106595521 A, 2017.04.26

CN 108801932 A, 2018.11.13

CN 101865827 A, 2010.10.20

CN 104730001 A, 2015.06.24

CN 111122459 A, 2020.05.08

CN 113310907 A, 2021.08.27

US 2009103099 A1, 2009.04.23

US 2009103099 A1, 2009.04.23

US 2006103933 A1, 2006.05.18

CN 106681026 A, 2017.05.17

K.Mok et al..Thickness independent magneto-optical coupling constant of nickel films in the visible spectral range.《Journal of Applied Physics》.2011, 第110卷第1-4页.

朱绪丹等.椭圆偏振光谱测量技术及其在薄膜材料研究中的应用.《中国光学》.2019, (第06期), (续)

审查员 张广路

权利要求书3页 说明书14页 附图3页

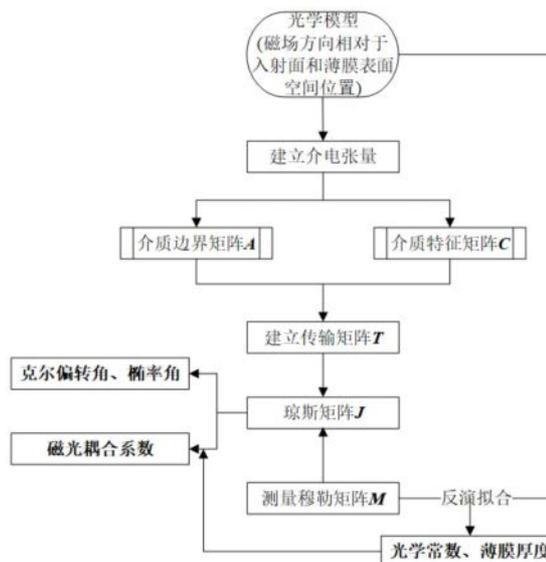
(54) 发明名称

一种磁性薄膜的磁光参数表征方法及系统

(57) 摘要

本发明公开了一种磁性薄膜的磁光参数表征方法及系统,属于磁光偏振测量领域,包括:测量由基底、磁性薄膜及空气所构成的三介质系统的椭圆参数 $\psi$ 、 $\Delta$ 和全穆勒矩阵M;利用M分别计算入射P光到反射P光和反射S光的反射系数 $r_{PP}$ 和 $r_{SP}$ ,以及入射S光到反射P光和反射S光的反射系数 $r_{PS}$ 和 $r_{SS}$ ,并利用 $\psi$ 、 $\Delta$ 进行椭圆分析,以获得厚度d和复折射率 $N_2$ ;利用所计算的反射系数及椭圆分析结果计算复磁光耦合系数Q,并计算P光和S光的磁光克尔偏转角 $\phi'_p$ 和 $\phi'_s$ ,以及P光和S光的椭圆率角 $\phi''_p$ 和 $\phi''_s$ ,计算公式中直接保留 $2\pi dN_2 \cos \theta_2 / \lambda$ 项。本发明在磁性薄膜厚度较大时,仍然能够准确表征其磁光参数,可适用于铁氧体磁性薄膜等厚度分布范围较大的磁性薄膜

磁光参数表征。



CN 113916797 B

[接上页]

**(56) 对比文件**

韩瑞等. 旋转磁光光纤光栅的磁圆相关损耗特性研究.《激光与光电子学进展》.2013, (第09期),

顾培夫等. 用于倾斜入射的波分复用薄膜滤光片的特性及改进.《光学学报》.2003, (第03期),

殷学会等. 反射相移对MEMS滤波器半峰全宽影响分析.《光子学报》.2006, (第03期),

Jiamin Liu et al.. Characterization of dielectric function for metallic thin

films based on ellipsometric parameters and reflectivity.《Physical Scripta》.2019, 第94卷第1-16页.

江浩等. 基于Mueller矩阵成像椭偏仪的纳米结构几何参数大面积测量.《物理学报》.2016, 第65卷(第7期), 第77-87页.

宋浩男. 旋转补偿器的光谱磁光椭偏系统研究.《中国优秀硕士学位论文全文数据库 工程技术I辑》.2019, (第9期), 第B020-508页.

王晓. 纳米尺度磁性薄膜材料的磁光特性研究.《中国优秀博士学位论文全文数据库 基础科学辑》.2014, (第10期), 第A005-96页.

1. 一种磁性薄膜的磁光参数表征方法,其特征在于,所述磁光参数包括:厚度d,复折射率 $N_2$ ,复磁光耦合系数Q,P光和S光的磁光克尔偏转角 $\varphi'_p$ 和 $\varphi'_s$ ,以及P光和S光的椭率角 $\varphi''_p$ 和 $\varphi''_s$ ;所述磁光参数表征方法包括:

测量由基底、所述磁性薄膜及空气所构成的三介质系统的椭偏参数 $\psi$ 、 $\Delta$ 和全穆勒矩阵M;椭偏参数 $\psi$ 、 $\Delta$ 分别表示经过所述三介质系统的反射光束相对于入射光束的振幅比角和相位差角;

利用所述全穆勒矩阵M分别计算入射P光到反射P光和反射S光的反射系数 $r_{PP}$ 和 $r_{SP}$ ,以及入射S光到反射P光和反射S光的反射系数 $r_{PS}$ 和 $r_{SS}$ ,并利用所述椭偏参数 $\psi$ 、 $\Delta$ 进行椭偏分析,以获得所述厚度d和复折射率 $N_2$ ;

利用所计算的反射系数及椭偏分析结果计算所述复磁光耦合系数Q,并计算磁光克尔偏转角 $\varphi'_p$ 和 $\varphi'_s$ ,以及椭率角 $\varphi''_p$ 和 $\varphi''_s$ ;其中,

$$Q = r_{SP} \left( N_1 N_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 c + N_2 N_3 \cos \theta_2 \cos \theta_3 c - i N_1 N_3 \cos \theta_1 \cos \theta_3 s - i N_2^2 \cos^2 \theta_2 s \right) \\ \times \left( i N_1 N_3 \cos^2 \theta_2 s + i N_2^2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 s - N_1 N_2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 c - N_2 N_3 \cos \theta_1 \cos \theta_2 c \right) \cos \theta_2 ; \\ / \left[ N_1^2 \cos \theta_1 \sin \theta_1 \left( k d N_2^2 N_3 \cos^3 \theta_2 - k d N_2^2 N_3 \cos \theta_2 \cos^2 \theta_3 + N_2 N_3 \cos^2 \theta_2 c s \right) \right. \\ \left. + N_2 N_3 \cos^2 \theta_3 c s - i N_3^2 \cos \theta_2 \cos \theta_3 s^2 - i N_2^2 \cos \theta_2 \cos \theta_3 s^2 \right]$$

$N_1$ 和 $N_3$ 分别表示空气和所述基底的复折射率, $\theta_1$ 表示空气与所述磁性薄膜界面处的入射角, $\theta_2$ 和 $\theta_3$ 分别表示所述磁性薄膜和所述基底中的折射角;

$c = \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} d N_2 \cos \theta_2 \right)$ ,  $s = \sin \left( \frac{2\pi}{\lambda} d N_2 \cos \theta_2 \right)$ , $\lambda$ 表示入射光波长; $k = 2\pi/\lambda$ 表示波数。

2. 如权利要求1所述的磁性薄膜的磁光参数表征方法,其特征在于,计算磁光克尔偏转角 $\varphi'_p$ 和 $\varphi'_s$ ,以及椭率角 $\varphi''_p$ 和 $\varphi''_s$ ,其计算公式为: $\varphi'_p + i\varphi''_p = \frac{r_{SP}}{r_{PP}}$ ,  $\varphi'_s + i\varphi''_s = \frac{r_{PS}}{r_{SS}}$ 。

3. 如权利要求2所述的磁性薄膜的磁光参数表征方法,其特征在于,在计算磁光克尔偏转角 $\varphi'_p$ 和 $\varphi'_s$ ,以及椭率角 $\varphi''_p$ 和 $\varphi''_s$ 之前,还包括,按照如下公式对反射系数进行更新:

$$r_{SS} = \frac{N_1 N_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 c - N_2 N_3 \cos \theta_2 \cos \theta_3 c - i N_1 N_3 \cos \theta_1 \cos \theta_3 s + i N_2^2 \cos^2 \theta_2 s}{N_1 N_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 c + N_2 N_3 \cos \theta_2 \cos \theta_3 c - i N_1 N_3 \cos \theta_1 \cos \theta_3 s - i N_2^2 \cos^2 \theta_2 s} \\ r_{PP} = \frac{N_2 N_3 \cos \theta_1 \cos \theta_2 c - N_1 N_2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 c - i N_2^2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 s + i N_1 N_3 \cos^2 \theta_2 s}{N_2 N_3 \cos \theta_1 \cos \theta_2 c + N_1 N_2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 c - i N_2^2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 s - i N_1 N_3 \cos^2 \theta_2 s}$$

$$r_{SP} = \frac{N_1^2 \cos \theta_1 \sin \theta_1 Q}{\left( N_1 N_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 c + N_2 N_3 \cos \theta_2 \cos \theta_3 c - i N_1 N_3 \cos \theta_1 \cos \theta_3 s - i N_2^2 \cos^2 \theta_2 s \right)}$$

$$\times \frac{\left( \frac{2\pi}{\lambda} d N_2^2 N_3 \cos^3 \theta_2 - \frac{2\pi}{\lambda} d N_2^2 N_3 \cos \theta_2 \cos^2 \theta_3 + N_2 N_3 \cos^2 \theta_2 c s \right)}{\left( + N_2 N_3 \cos^2 \theta_3 c s - i N_3^2 \cos \theta_2 \cos \theta_3 s^2 - i N_2^2 \cos \theta_2 \cos \theta_3 s^2 \right)}$$

$$r_{PS} = -r_{SP}$$

并且,计算磁光克尔偏转角  $\varphi'_p$  和  $\varphi'_s$ , 以及椭率角  $\varphi''_p$  和  $\varphi''_s$  时,各反射系数为更新后的值。

4. 如权利要求1~3任一项所述的磁性薄膜的磁光参数表征方法,其特征在于,利用磁光椭偏测量装置测量所述三介质系统的椭偏参数  $\psi$ 、 $\Delta$  和全穆勒矩阵  $M$ ; 所述磁光椭偏测量装置包括: 椭偏测量模块、磁场加载模块以及样品台;

所述椭偏测量模块包括入射起偏光路和反射检偏光路,入射起偏光路上的测量光经所述样品台上的待测样品反射后进入所述反射检偏光路,其中,所述入射起偏光路沿光路方向依次布置有光源、准直透镜以及偏振态发生组件,所述反射检偏光路沿光路方向依次布置有偏振态探测组件、会聚透镜以及光谱仪;

所述磁场加载模块包括水平磁场加载模块以及竖直磁场加载模块,其中,所述水平磁场加载模块包括水平移动组件、第一永久磁铁磁极对、旋转台,所述水平移动组件对称设于平行设于所述样品台两侧,所述旋转台用于带动所述水平移动组件在水平面内旋转,第一永久磁铁磁极对中的两磁铁设于所述样品台的两侧并分别设于所述水平移动组件上,使两磁铁相向或向背运动;所述竖直磁场加载模块包括竖直移动组件以及第二永久磁铁磁极对,所述竖直移动组件垂直于所述样品台平面,所述第二永久磁铁磁极对的两磁铁设于所述样品台的上下侧并分别设于所述竖直移动组件上,使得所述第二永久磁铁磁极对的两磁铁相对所述样品台上的样品相向或相背运动。

5. 如权利要求1~3任一项所述的磁性薄膜的磁光参数表征方法,其特征在于,利用所述全穆勒矩阵  $M$  分别计算入射P光到反射P光和反射S光的反射系数  $r_{PP}$  和  $r_{PS}$ , 以及入射S光到反射P光和反射S光的反射系数  $r_{SP}$  和  $r_{SS}$ , 其计算公式为:

$$M = A(J \otimes J^*) A^{-1}, \quad J = \begin{pmatrix} r_{PP} & r_{PS} \\ r_{SP} & r_{SS} \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & i & -i & 0 \end{pmatrix}$$

其中,  $J$  表示琼斯矩阵,  $J^*$  表示  $J$  的复共轭。

6. 一种单层铁氧体磁性薄膜的磁光参数表征方法,其特征在于,包括: 利用权利要求1~5任一项所述的磁性薄膜的磁光参数表征方法对所述单层铁氧体磁性薄膜的磁光参数进行表征。

7. 一种磁性薄膜的磁光参数表征系统,其特征在于,所述磁光参数包括: 厚度  $d$ , 复折射

率 $N_2$ ,复磁光耦合系数 $Q$ ,P光和S光的磁光克尔偏转角 $\varphi'_p$ 和 $\varphi'_s$ ,以及P光和S光的椭率角 $\varphi''_p$ 和 $\varphi''_s$ ;所述磁光参数表征系统包括:磁光椭偏测量装置、椭偏分析模块以及磁学参数表征模块;

所述磁光椭偏测量装置,用于测量由基底、所述磁性薄膜及空气所构成的三介质系统的椭偏参数 $\psi$ 、 $\Delta$ 和全穆勒矩阵 $M$ ;椭偏参数 $\psi$ 、 $\Delta$ 分别表示经过所述三介质系统的反射光束相对于入射光束的振幅比角和相位差角;

所述椭偏分析模块,用于利用所述全穆勒矩阵 $M$ 分别计算入射P光到反射P光和反射S光的反射系数 $r_{PP}$ 和 $r_{SP}$ ,以及入射S光到反射P光和反射S光的反射系数 $r_{PS}$ 和 $r_{SS}$ ,并利用所述椭偏参数 $\psi$ 、 $\Delta$ 进行椭偏分析,以获得所述厚度 $d$ 和复折射率 $N_2$ ;

所述磁学参数表征模块,用于利用所计算的反射系数及椭偏分析结果计算所述复磁光耦合系数 $Q$ ,并计算磁光克尔偏转角 $\varphi'_p$ 和 $\varphi'_s$ ,以及椭率角 $\varphi''_p$ 和 $\varphi''_s$ ;其中,

$$Q = r_{SP} \left( N_1 N_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 c + N_2 N_3 \cos \theta_2 \cos \theta_3 c - i N_1 N_3 \cos \theta_1 \cos \theta_3 s - i N_2^2 \cos^2 \theta_2 s \right) \\ \times \left( i N_1 N_3 \cos^2 \theta_2 s + i N_2^2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 s - N_1 N_2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 c - N_2 N_3 \cos \theta_1 \cos \theta_2 c \right) \cos \theta_2 \quad ; \\ / \left[ N_1^2 \cos \theta_1 \sin \theta_1 \left( k d N_2^2 N_3 \cos^3 \theta_2 - k d N_2^2 N_3 \cos \theta_2 \cos^2 \theta_3 + N_2 N_3 \cos^2 \theta_2 c s \right) \right. \\ \left. + N_2 N_3 \cos^2 \theta_3 c s - i N_3^2 \cos \theta_2 \cos \theta_3 s^2 - i N_2^2 \cos \theta_2 \cos \theta_3 s^2 \right]$$

$N_1$ 和 $N_3$ 分别表示空气和所述基底的复折射率, $\theta_1$ 表示空气与所述磁性薄膜界面处的入射角, $\theta_2$ 和 $\theta_3$ 分别表示所述磁性薄膜和所述基底中的折射角;

$c = \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} d N_2 \cos \theta_2 \right)$ ,  $s = \sin \left( \frac{2\pi}{\lambda} d N_2 \cos \theta_2 \right)$ , $\lambda$ 表示入射光波长; $k = 2\pi/\lambda$ 表示波数。

8.如权利要求7所述的磁性薄膜的磁光参数表征系统,其特征在于,所述磁光椭偏测量装置包括:椭偏测量模块、磁场加载模块以及样品台;

所述椭偏测量模块包括入射起偏光路和反射检偏光路,入射起偏光路上的测量光经所述样品台上的待测样品反射后进入所述反射检偏光路,其中,所述入射起偏光路沿光路方向依次布置有光源、准直透镜以及偏振态发生组件,所述反射检偏光路沿光路方向依次布置有偏振态探测组件、会聚透镜以及光谱仪;

所述磁场加载模块包括水平磁场加载模块以及竖直磁场加载模块,其中,所述水平磁场加载模块包括水平移动组件、第一永久磁铁磁极对、旋转台,所述水平移动组件对称设于平行设于所述样品台两侧,所述旋转台用于带动所述水平移动组件在水平面内旋转,第一永久磁铁磁极对中的两磁铁设于所述样品台的两侧并分别设于所述水平移动组件上,使两磁铁相向或向背运动;所述竖直磁场加载模块包括竖直移动组件以及第二永久磁铁磁极对,所述竖直移动组件垂直于所述样品台平面,所述第二永久磁铁磁极对的两磁铁设于所述样品台的上下侧并分别设于所述竖直移动组件上,使得所述第二永久磁铁磁极对的两磁铁相对所述样品台上的样品相向或相背运动。

## 一种磁性薄膜的磁光参数表征方法及系统

### 技术领域

[0001] 本发明属磁光偏振测量领域,更具体地,涉及一种磁性薄膜的磁光参数表征方法及系统。

### 背景技术

[0002] 当存在外界磁场加载条件时,磁性材料的光学参数会发生变化,这就是材料的磁光效应。由于深入认识与理解磁光效应是开发磁光存储器件、磁光传感器件、自旋电子器件等微电子器件的技术基础,那么准确表征磁性材料的磁光参数对研制各类磁光器件甚至优化与改善器件性能起到至关重要的作用。能源、医疗、工业、国防科技等领域的快速发展对磁光器件在高集成、高密度存储、小型化、低功耗等方面提出了越来越高的要求。同时,随着纳米薄膜材料的飞速发展,各种新兴的纳米功能薄膜材料在多个领域发挥着越来越重要的作用。磁性薄膜材料因其独特的磁光特性、可高度集成化、低能量损耗等优点而广泛应用于磁光存储、磁光传感、自旋电子器件等领域。

[0003] 磁光克尔效应表现为:偏振光入射到磁化的物质表面时,反射光偏振面发生微小旋转。磁光克尔效应在磁光器件的快速发展中起到不可或缺的作用,也成为磁性超薄膜表征的主要理论依据,同时也被广泛应用于磁光克尔偏转角、磁畴结构、磁滞回线等磁学特性的研究。椭偏测量是一种通过捕获光束在样品表面反射前后的幅值衰减与相位改变量而获取待测样品信息的测量技术,其能够以无损、非接触、快速的方式表征材料的光学常数、膜厚以及微纳结构特性。将磁光克尔效应与椭偏测量技术相结合所产生的磁光椭偏测量方法兼具上述优点,是表征磁性薄膜材料的强有力的工具。

[0004] 传统的磁性薄膜多为金属磁性薄膜,因其对光的吸收特性,金属磁性薄膜的厚度一般小于40nm。以铁氧体为代表的亚铁磁材料具有诸多独特的优点,如磁导率高、介电损耗小、涡流低、电阻率高、稳定性好等,并且厚度可调控,不会像金属磁性薄膜那样受渗透深度的限制,这一优点使其磁光克尔偏转角等磁学参数具有更大的调控范围,因此,在铁氧体磁性材料在微波器件、射频器件、存储器等器件的应用中起着更加关键的作用。为更好地利用铁氧体磁性薄膜,对此类材料的磁光参数进行精确表征具有十分重要的研究意义。

[0005] 现有的磁光椭偏分析方法专注于金属磁性薄膜的磁光参数表征,考虑到金属磁性薄膜的厚度较小,因此在分析过程中采用了许多简化形式,但对铁氧体磁性薄膜进行磁光椭偏分析需要考虑其厚度的分布范围,现有方法难以适用于厚度大于40nm的铁氧体薄膜的分析。

[0006] 因此,本领域亟待提出一种可以适用于所有厚度的磁性薄膜材料、可以准确和快速地提取出更多磁光参数信息的表征方法。

### 发明内容

[0007] 针对现有技术的缺陷和改进需求,本发明提供了一种磁性薄膜的磁光参数表征方法及系统,其目的在于,实现对各种厚度的磁性薄膜磁光参数的准确表征。

[0008] 为实现上述目的,按照本发明的一个方面,提供了一种磁性薄膜的磁光参数表征方法,磁光参数包括:厚度 $d$ ,复折射率 $N_2$ ,复磁光耦合系数 $Q$ ,P光和S光的磁光克尔偏转角 $\varphi'_p$ 和 $\varphi'_s$ ,以及P光和S光的椭率角 $\varphi''_p$ 和 $\varphi''_s$ ;磁光参数表征方法包括:

[0009] 测量由基底、磁性薄膜及空气所构成的三介质系统的椭偏参数 $\psi$ 、 $\Delta$ 和全穆勒矩阵 $M$ ;椭偏参数 $\psi$ 、 $\Delta$ 分别表示经过三介质系统的反射光束相对于入射光束的振幅比角和相位差角;

[0010] 利用全穆勒矩阵 $M$ 分别计算入射P光到反射P光和反射S光的反射系数 $r_{PP}$ 和 $r_{SP}$ ,以及入射S光到反射P光和反射S光的反射系数 $r_{PS}$ 和 $r_{SS}$ ,并利用椭偏参数 $\psi$ 、 $\Delta$ 进行椭偏分析,以获得厚度 $d$ 和复折射率 $N_2$ ;

[0011] 利用所计算的反射系数及椭偏分析结果计算复磁光耦合系数 $Q$ ,并计算磁光克尔偏转角 $\varphi'_p$ 和 $\varphi'_s$ ,以及椭率角 $\varphi''_p$ 和 $\varphi''_s$ ;其中,

$$[0012] \quad Q = r_{SP} \left( N_1 N_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 c + N_2 N_3 \cos \theta_2 \cos \theta_3 c - i N_1 N_3 \cos \theta_1 \cos \theta_3 s - i N_2^2 \cos^2 \theta_2 s \right) \\ \times \left( i N_1 N_3 \cos^2 \theta_2 s + i N_2^2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 s - N_1 N_2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 c - N_2 N_3 \cos \theta_1 \cos \theta_2 c \right) \cos \theta_2 ; \\ / \left[ N_1^2 \cos \theta_1 \sin \theta_1 \left( \begin{array}{l} k d N_2^2 N_3 \cos^3 \theta_2 - k d N_2^2 N_3 \cos \theta_2 \cos^2 \theta_3 + N_2 N_3 \cos^2 \theta_2 c s \\ + N_2 N_3 \cos^2 \theta_3 c s - i N_3^2 \cos \theta_2 \cos \theta_3 s^2 - i N_2^2 \cos \theta_2 \cos \theta_3 s^2 \end{array} \right) \right]$$

[0013]  $N_1$ 和 $N_3$ 分别表示空气和基底的复折射率, $\theta_1$ 表示空气与磁性薄膜界面处的入射角,

$\theta_2$ 和 $\theta_3$ 分别表示磁性薄膜和基底中的折射角; $c = \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} d N_2 \cos \theta_2 \right)$ ,

$s = \sin \left( \frac{2\pi}{\lambda} d N_2 \cos \theta_2 \right)$ , $\lambda$ 表示入射光波长; $k = 2\pi/\lambda$ 表示波数。

[0014] 进一步地,计算磁光克尔偏转角 $\varphi'_p$ 和 $\varphi'_s$ ,以及椭率角 $\varphi''_p$ 和 $\varphi''_s$ ,其计算公式为:

$$\varphi'_p + i\varphi''_p = \frac{r_{SP}}{r_{PP}}, \quad \varphi'_s + i\varphi''_s = \frac{r_{PS}}{r_{SS}}。$$

[0015] 进一步地,在计算磁光克尔偏转角 $\varphi'_p$ 和 $\varphi'_s$ ,以及椭率角 $\varphi''_p$ 和 $\varphi''_s$ 之前,还包括,按照如下公式对反射系数进行更新:

$$[0016] \quad r_{SS} = \frac{N_1 N_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 c - N_2 N_3 \cos \theta_2 \cos \theta_3 c - i N_1 N_3 \cos \theta_1 \cos \theta_3 s + i N_2^2 \cos^2 \theta_2 s}{N_1 N_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 c + N_2 N_3 \cos \theta_2 \cos \theta_3 c - i N_1 N_3 \cos \theta_1 \cos \theta_3 s - i N_2^2 \cos^2 \theta_2 s}$$

$$[0017] \quad r_{PP} = \frac{N_2 N_3 \cos \theta_1 \cos \theta_2 c - N_1 N_2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 c - i N_2^2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 s + i N_1 N_3 \cos^2 \theta_2 s}{N_2 N_3 \cos \theta_1 \cos \theta_2 c + N_1 N_2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 c - i N_2^2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 s - i N_1 N_3 \cos^2 \theta_2 s}$$

$$\begin{aligned}
 r_{SP} = & \frac{N_1^2 \cos \theta_1 \sin \theta_1 Q}{\left( N_1 N_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 c + N_2 N_3 \cos \theta_2 \cos \theta_3 c - i N_1 N_3 \cos \theta_1 \cos \theta_3 s - i N_2^2 \cos^2 \theta_2 s \right)} \\
 [0018] \quad & \left( \frac{2\pi}{\lambda} d N_2^2 N_3 \cos^3 \theta_2 - \frac{2\pi}{\lambda} d N_2^2 N_3 \cos \theta_2 \cos^2 \theta_3 + N_2 N_3 \cos^2 \theta_2 c s \right) \\
 & \times \frac{\left( + N_2 N_3 \cos^2 \theta_3 c s - i N_3^2 \cos \theta_2 \cos \theta_3 s^2 - i N_2^2 \cos \theta_2 \cos \theta_3 s^2 \right)}{\left( i N_1 N_3 \cos^2 \theta_2 s + i N_2^2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 s - N_1 N_2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 c - N_2 N_3 \cos \theta_1 \cos \theta_2 c \right) \cos \theta_2} \\
 r_{PS} = & -r_{SP}
 \end{aligned}$$

[0019] 并且,计算磁光克尔偏转角 $\varphi'_p$ 和 $\varphi'_s$ ,以及椭率角 $\varphi''_p$ 和 $\varphi''_s$ 时,各反射系数为更新后的值。

[0020] 进一步地,利用磁光椭偏测量装置测量三介质系统的椭偏参数 $\psi$ 、 $\Delta$ 和全穆勒矩阵M;磁光椭偏测量装置包括:椭偏测量模块、磁场加载模块以及样品台;

[0021] 椭偏测量模块包括入射起偏光路和反射检偏光路,入射起偏光路上的测量光经样品台上的待测样品反射后进入反射检偏光路,其中,入射起偏光路沿光路方向依次布置有光源、准直透镜以及偏振态发生组件,反射检偏光路沿光路方向依次布置有偏振态探测组件、会聚透镜以及光谱仪;

[0022] 磁场加载模块包括水平磁场加载模块以及竖直磁场加载模块,其中,水平磁场加载模块包括水平移动组件、第一永久磁铁磁极对、旋转台,水平移动组件对称设于平行设于样品台两侧,旋转台用于带动水平移动组件在水平面内旋转,第一永久磁铁磁极对中的两磁铁设于样品台的两侧并分别设于水平移动组件上,使两磁铁相向或向背运动;竖直磁场加载模块包括竖直移动组件以及第二永久磁铁磁极对,竖直移动组件垂直于样品台平面,第二永久磁铁磁极对的两磁铁设于样品台的上下侧并分别设于竖直移动组件上,使得第二永久磁铁磁极对的两磁铁相对样品台上的样品相向或相背运动。

[0023] 进一步地,利用全穆勒矩阵M分别计算入射P光到反射P光和反射S光的反射系数 $r_{PP}$ 和 $r_{SP}$ ,以及入射S光到反射P光和反射S光的反射系数 $r_{PS}$ 和 $r_{SS}$ ,其计算公式为:

$$[0024] \quad \mathbf{M} = \mathbf{A}(\mathbf{J} \otimes \mathbf{J}^*) \mathbf{A}^{-1}, \quad \mathbf{J} = \begin{pmatrix} r_{PP} & r_{PS} \\ r_{SP} & r_{SS} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & i & -i & 0 \end{pmatrix}$$

[0025] 其中,J表示琼斯矩阵, $J^*$ 表示J的复共轭。

[0026] 按照本发明的另一个方面,提供了一种单层铁氧体磁性薄膜的磁光参数表征方法,包括:利用本发明提供的上述磁性薄膜的磁光参数表征方法对单层铁氧体磁性薄膜的磁光参数进行表征。

[0027] 按照本发明的又一个方面,提供了一种磁性薄膜的磁光参数表征系统,磁光参数包括:厚度d,复折射率 $N_2$ ,复磁光耦合系数Q,P光和S光的磁光克尔偏转角 $\varphi'_p$ 和 $\varphi'_s$ ,以及P光和S光的椭率角 $\varphi''_p$ 和 $\varphi''_s$ ;磁光参数表征系统包括:磁光椭偏测量装置、椭偏分析模块以及磁学参数表征模块;

[0028] 磁光椭偏测量装置,用于测量由基底、磁性薄膜及空气所构成的三介质系统的椭偏参数 $\psi$ 、 $\Delta$ 和全穆勒矩阵M;椭偏参数 $\psi$ 、 $\Delta$ 分别表示经过三介质系统的反射光束相对于入射光束的振幅比角和相位差角;

[0029] 椭偏分析模块,用于利用全穆勒矩阵M分别计算入射P光到反射P光和反射S光的反射系数 $r_{PP}$ 和 $r_{SP}$ ,以及入射S光到反射P光和反射S光的反射系数 $r_{PS}$ 和 $r_{SS}$ ,并利用椭偏参数 $\psi$ 、 $\Delta$ 进行椭偏分析,以获得厚度d和复折射率 $N_2$ ;

[0030] 磁学参数表征模块,用于利用所计算的反射系数及椭偏分析结果计算复磁光耦合系数Q,并计算磁光克尔偏转角 $\varphi'_p$ 和 $\varphi'_s$ ,以及椭率角 $\varphi''_p$ 和 $\varphi''_s$ ;其中,

$$[0031] \quad Q = r_{SP} \left( N_1 N_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 c + N_2 N_3 \cos \theta_2 \cos \theta_3 c - i N_1 N_3 \cos \theta_1 \cos \theta_3 s - i N_2^2 \cos^2 \theta_2 s \right) \\ \times \left( i N_1 N_3 \cos^2 \theta_2 s + i N_2^2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 s - N_1 N_2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 c - N_2 N_3 \cos \theta_1 \cos \theta_2 c \right) \cos \theta_2 ; \\ / \left[ N_1^2 \cos \theta_1 \sin \theta_1 \left( \begin{array}{l} k d N_2^2 N_3 \cos^3 \theta_2 - k d N_2^2 N_3 \cos \theta_2 \cos^2 \theta_3 + N_2 N_3 \cos^2 \theta_2 c s \\ + N_2 N_3 \cos^2 \theta_3 c s - i N_3^2 \cos \theta_2 \cos \theta_3 s^2 - i N_2^2 \cos \theta_2 \cos \theta_3 s^2 \end{array} \right) \right]$$

[0032]  $N_1$ 和 $N_3$ 分别表示空气和基底的复折射率, $\theta_1$ 表示空气与磁性薄膜界面处的入射角, $\theta_2$ 和 $\theta_3$ 分别表示磁性薄膜和基底中的折射角; $c = \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} d N_2 \cos \theta_2 \right)$ ,

$$s = \sin \left( \frac{2\pi}{\lambda} d N_2 \cos \theta_2 \right), \lambda \text{表示入射光波长}; k = 2\pi/\lambda \text{表示波数}。$$

[0033] 进一步地,磁光椭偏测量装置包括:椭偏测量模块、磁场加载模块以及样品台;

[0034] 椭偏测量模块包括入射起偏光路和反射检偏光路,入射起偏光路上的测量光经样品台上的待测样品反射后进入反射检偏光路,其中,入射起偏光路沿光路方向依次布置有光源、准直透镜以及偏振态发生组件,反射检偏光路沿光路方向依次布置有偏振态探测组件、会聚透镜以及光谱仪;

[0035] 磁场加载模块包括水平磁场加载模块以及竖直磁场加载模块,其中,水平磁场加载模块包括水平移动组件、第一永久磁铁磁极对、旋转台,水平移动组件对称设于平行设于样品台两侧,旋转台用于带动水平移动组件在水平面内旋转,第一永久磁铁磁极对中的两磁铁设于样品台的两侧并分别设于水平移动组件上,使两磁铁相向或向背运动;竖直磁场加载模块包括竖直移动组件以及第二永久磁铁磁极对,竖直移动组件垂直于样品台平面,第二永久磁铁磁极对的两磁铁设于样品台的上下侧并分别设于竖直移动组件上,使得第二永久磁铁磁极对的两磁铁相对样品台上的样品相向或相背运动。

[0036] 总体而言,通过本发明所构思的以上技术方案,能够取得以下有益效果:

[0037] (1) 本发明基于椭偏分析的结果计算磁性薄膜的复磁光耦合系数Q时,计算公式中直接保留了 $\frac{2\pi}{\lambda} d N_2 \cos \theta_2$ 项,而未对该项进行简化,因此,在磁性薄膜厚度较大(>40nm)

时,仍然能够准确表征包括复磁光耦合系数Q在内的磁光参数,其适用性更强,对于铁氧体磁性薄膜这一类具有较大的厚度分布范围的磁性薄膜,也能精确表征其磁光参数。

[0038] (2) 本发明在计算磁光克尔偏转角和椭率角之前,先对反射系数进行更新,在更新

的过程中,直接保留了 $\frac{2\pi}{\lambda}dN_2 \cos\theta_2$ 项,而未对该项进行简化,因此,在磁性薄膜厚度较大(>40nm)时,仍然能够准确表征磁性薄膜的磁光克尔偏转角和椭率角,进一步提高所表征的磁光参数的精度。

[0039] (3) 本发明所表征的磁光参数,同时包括结构参数(即磁性薄膜的厚度),光学参数(即磁性薄膜的复折射率),以及磁学参数(即磁光克尔偏转角和椭率角),对测量对象无损,测量过程快速高效且能获得多种信息。

[0040] (4) 本发明所搭建的磁光椭偏测量装置,可以调节非常大的磁场范围(0~350mT),能使大多数的磁性薄膜材料达到饱和磁化强度,且测量光谱范围大(193nm~1690nm),相比于现有的磁光椭偏分析方法只能测量单波长点或者较窄光谱范围的磁光参数,本发明能获得更多的光谱磁光参数。

## 附图说明

[0041] 图1为本发明实施例提供的空气-磁性薄膜-基底三介质系统的坐标轴及界面光传播方向示意图;

[0042] 图2为本发明实施例所使用的磁光椭偏测量装置示意图;

[0043] 图3为本发明实施例提供的磁性薄膜的磁光参数表征方法示意图;

[0044] 在所有附图中,相同的附图标记用来表示相同的元件或结构,其中:

[0045] 100-椭偏测量模块:

[0046] 111-光源;112-准直透镜;113-偏振态发生组件;121-偏振态探测组件;122-会聚透镜;123-光谱仪;

[0047] 200-磁场加载模块:

[0048] 210-水平磁场加载模块;211-水平移动组件;212a、212b-第一永久磁铁磁极对;213-旋转台;211a-第一双向丝杠;211b-第一基座;

[0049] 300-样品台:

[0050] 310-样品。

## 具体实施方式

[0051] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下结合附图及实施例,对本发明进行进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。此外,下面所描述的本发明各个实施方式中所涉及到的技术特征只要彼此之间未构成冲突就可以相互组合。

[0052] 在本发明中,本发明及附图中的术语“第一”、“第二”等(如果存在)是用于区别类似的对象,而不必用于描述特定的顺序或先后次序。

[0053] 本发明所提供的磁性薄膜的磁光参数表征方法及系统,可实现对各种厚度、各种材质磁性薄膜磁光参数的准确表征,包括金属磁性薄膜等厚度分布范围较小的磁性薄膜,以及铁氧体磁性薄膜等厚度分布范围较大的磁性薄膜,不失一般性地,在以下实施例中,以硅基底上的厚度为87nm的铁酸镍(以下简称NFO)单层磁性薄膜材料为例,对本发明做进一步的解释说明。为了对该磁性薄膜材料的磁光参数进行表征,本发明预先建立了如图1所示

的空气-磁性薄膜-基底三介质系统,并建立了该三介质系统的坐标轴。

[0054] 在进行具体分析之前,通过如下方式建立三介质系统的坐标系:如图1所示,坐标系原点在入射光束和反射光束与水平面相交的点,也就是所谓的最佳测量面,可利用磁光椭偏测量装置自动获取该最佳测量面;最佳测量面就是铁磁性薄膜样品的上表面,z轴垂直于此最佳测量面向下,x轴与y轴是位于此最佳测量面内的;更进一步地,椭偏测量系统中,入射光束与反射光束与铁磁薄膜样品表面法线共同构成了入射面,此入射面与样品表面交线为y轴,x轴是垂直于入射面,但位于样品表面内的轴。图1中,①、②、③、④分别表示磁性薄膜中的4束光, $\theta_1$ 表示空气与磁性薄膜界面处的入射角, $\theta_2$ 和 $\theta_3$ 分别表示磁性薄膜和基底中的折射角, $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$ 分别表示空气、磁性薄膜和基底中的电场强度,上标(1)、(2)、(3)、(4)分别与四束光相对应,上标i、r、t分别入射光、反射光和透射光。

[0055] 为了扩大测量光谱范围,作为一种优选的实施方式,本发明利用宽光谱穆勒矩阵椭偏仪与磁场加载模块搭建磁光椭偏测量装置,研究三介质系统的纵向磁光克尔效应,以对其进行磁光椭偏分析。以下实施例中优选采用双旋转补偿器型穆勒矩阵椭偏仪,优选采用永磁体为磁场源。以下实施例中,所采用的磁光椭偏测量装置如图2所示,包括椭偏测量模块100、磁场加载模块200以及样品台300,其中:

[0056] 椭偏测量模块100包括入射起偏光路和反射检偏光路,入射起偏光路上的测量光经样品台300上的待测样品反射后进入反射检偏光路,其中,入射起偏光路沿光路方向依次布置有光源111、准直透镜112以及偏振态发生组件113,反射检偏光路沿光路方向依次布置有偏振态探测组件121、会聚透镜122以及光谱仪123;

[0057] 磁场加载模块200包括水平磁场加载模块210以及竖直磁场加载模块,其中,水平磁场加载模块210包括水平移动组件211、第一永久磁铁磁极对212a、212b、旋转台213,水平移动组件211对称设于平行设于样品台300两侧,旋转台213用于带动水平移动组件211在水平面内旋转,第一永久磁铁磁极对212a、212b中的两磁铁设于样品台300的两侧并分别设于水平移动组件211上,使两磁铁相向或向背运动;竖直磁场加载模块包括竖直移动组件以及第二永久磁铁磁极对,竖直移动组件垂直于样品台300平面,第二永久磁铁磁极对的两磁铁设于样品台300的上下侧并分别设于竖直移动组件上,使得第二永久磁铁磁极对的两磁铁相对样品台300上的样品相向或相背运动;

[0058] 水平移动组件211包括第一双向丝杠211a和设于第一双向丝杠211a两端的第一基座211b,第一永久磁铁磁极对212a、212b中的两磁铁分别设于第一基座211b上。

[0059] 上述磁光椭偏测量装置的具体结构,可参考申请公布号为CN113310907A、发明名称为“一种磁性椭偏测量装置”的专利申请文件;在实际测量时,图1所示的三介质系统作为样品310置于样品台300上。

[0060] 以下结合图1所示的三介质系统及图2所示的磁光椭偏测量系统,对本发明进行磁光参数表征的相关理论分析解释如下。

[0061] 如图3所示,首先,基于三介质系统的光学模型,即磁场方向相对于入射面和磁性材料薄膜表面空间位置,建立磁性薄膜的介电张量,由公式(1)表述:

$$[0062] \quad \boldsymbol{\varepsilon} = N_2^2 \begin{pmatrix} 1 & 0 & -iQ \\ 0 & 1 & 0 \\ iQ & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

[0063] 式中,  $N_2$ 表示磁性薄膜的复折射率,  $Q$ 表示复磁光耦合系数,  $i$ 表示虚数单位;

[0064] 整个三介质系统光学参数、磁学参数、结构参数包括: 空气的复折射率  $N_1 (n_1, k_1)$ , 磁性薄膜的复折射率  $N_2 (n_2, k_2)$ 、复磁光耦合系数  $Q$ 、薄膜厚度  $d$ , 基底的复折射率  $N_3 (n_3, k_3)$ , 系统整体的磁光克尔偏转角  $\varphi'$ , 椭率角  $\varphi''$ ; 复折射率中,  $n$ 表示折射率,  $k$ 表示吸收率, 下标数字1、2、3表示层数, 空气、磁性薄膜和基底的层数分别为1、2、3; 磁光克尔偏转角  $\varphi'$ 包括P光和S光的磁光克尔偏转角  $\varphi'_p$ 和  $\varphi'_s$ , 椭率角  $\varphi''$ 包括P光和S光的椭率角  $\varphi''_p$ 和  $\varphi''_s$ ;

[0065] 然后, 根据建立的纵向磁光克尔效应的介电张量, 推导空气、磁性薄膜和基底的介质边界矩阵  $A_1, A_2, A_3$ 。分析过程中下标数字1、2、3表示层数;  $x, y, z$ 表示坐标轴; P、S表示P光和S光; 上标  $i, r, t$ 分别表示入射光、反射光和透射光, 因为磁光耦合系数是一个极小量, 本发明的推导过程均只保留  $Q$ 的一阶项, 具体过程如下:

[0066] 根据磁性介质中传播的每个方向的光都是圆偏光, 且根据电位移矢量与电场强度的关系得到可以得到  $E_{2x}, E_{2y}, E_{2z}$ 之间的相互关系:

$$[0067] \quad E_{2y}^{(1)} = \left( -i \cos \theta_2^{(1)} - iQ \sin \theta_2^{(1)} \cos \theta_2^{(1)} \right) E_{2x}^{(1)}$$

$$[0068] \quad E_{2y}^{(2)} = \left( i \cos \theta_2^{(2)} - iQ \sin \theta_2^{(2)} \cos \theta_2^{(2)} \right) E_{2x}^{(2)}$$

$$[0069] \quad E_{2z}^{(1)} = \left( i \sin \theta_2^{(1)} - iQ \cos^2 \theta_2^{(1)} \right) E_{2x}^{(1)}$$

$$[0070] \quad E_{2z}^{(2)} = \left( -i \sin \theta_2^{(2)} - iQ \cos^2 \theta_2^{(2)} \right) E_{2x}^{(2)}$$

$$[0071] \quad E_{2y}^{(3)} = \left( i \cos \theta_2^{(3)} - iQ \sin \theta_2^{(3)} \cos \theta_2^{(3)} \right) E_{2x}^{(3)}$$

$$[0072] \quad E_{2y}^{(4)} = \left( -i \cos \theta_2^{(4)} - iQ \sin \theta_2^{(4)} \cos \theta_2^{(4)} \right) E_{2x}^{(4)}$$

$$[0073] \quad E_{2z}^{(3)} = \left( -i \sin \theta_2^{(3)} - iQ \cos^2 \theta_2^{(3)} \right) E_{2x}^{(3)}$$

$$[0074] \quad E_{2z}^{(4)} = \left( i \sin \theta_2^{(4)} - iQ \cos^2 \theta_2^{(4)} \right) E_{2x}^{(4)} \quad (2)$$

[0075] 结合公式(2), 将  $P_2$ 向量各元素用  $E_{2x}$ 来表示:

$$[0076] \quad P_2 = \left[ E_{2S}^i \quad E_{2P}^i \quad E_{2S}^r \quad E_{2P}^r \right]^T$$

$$[0077] \quad E_{2S}^i = E_{2x}^{(1)} + E_{2x}^{(2)}$$

$$\begin{aligned}
& \mathbf{E}_{2P}^i = \left( \mathbf{E}_{2y}^{(1)} + \mathbf{E}_{2y}^{(2)} \right) \cos \theta_2 - \left( \mathbf{E}_{2z}^{(1)} + \mathbf{E}_{2z}^{(2)} \right) \sin \theta_2 \\
[0078] \quad & = \left[ \left( -i \cos \theta_2^{(1)} - iQ \sin \theta_2^{(1)} \cos \theta_2^{(1)} \right) \cos \theta_2 - \left( i \sin \theta_2^{(1)} - iQ \cos^2 \theta_2^{(1)} \right) \sin \theta_2 \right] \mathbf{E}_{2x}^{(1)} \\
& + \left[ \left( i \cos \theta_2^{(2)} - iQ \sin \theta_2^{(2)} \cos \theta_2^{(2)} \right) \cos \theta_2 - \left( -i \sin \theta_2^{(2)} - iQ \cos^2 \theta_2^{(2)} \right) \sin \theta_2 \right] \mathbf{E}_{2x}^{(2)}
\end{aligned}$$

$$[0079] \quad \mathbf{E}_{2S}^r = \mathbf{E}_{2x}^{(3)} + \mathbf{E}_{2x}^{(4)}$$

$$\begin{aligned}
& \mathbf{E}_{2P}^r = -\left( \mathbf{E}_{2y}^{(3)} + \mathbf{E}_{2y}^{(4)} \right) \cos \theta_2 - \left( \mathbf{E}_{2z}^{(3)} + \mathbf{E}_{2z}^{(4)} \right) \sin \theta_2 \\
[0080] \quad & = \left[ \left( -i \cos \theta_2^{(3)} + iQ \sin \theta_2^{(3)} \cos \theta_2^{(3)} \right) \cos \theta_2 + \left( i \sin \theta_2^{(3)} + iQ \cos^2 \theta_2^{(3)} \right) \sin \theta_2 \right] \mathbf{E}_{2x}^{(3)} \quad (3) \\
& + \left[ \left( i \cos \theta_2^{(4)} + iQ \sin \theta_2^{(4)} \cos \theta_2^{(4)} \right) \cos \theta_2 + \left( -i \sin \theta_2^{(4)} + iQ \cos^2 \theta_2^{(4)} \right) \sin \theta_2 \right] \mathbf{E}_{2x}^{(4)}
\end{aligned}$$

[0081] 对于纵向磁光克尔效应,磁性介质的复折射率如公式(4)所示。

$$[0082] \quad N_2^{(1)} = N_2 \left( 1 + \frac{1}{2} \sin \theta_2 Q \right)$$

$$[0083] \quad N_2^{(2)} = N_2 \left( 1 - \frac{1}{2} \sin \theta_2 Q \right)$$

$$[0084] \quad N_2^{(3,4)} = N_2 \left( 1 - \frac{1}{2} \sin \theta_2 Q \right)$$

$$[0085] \quad N_2^{(3,4)} = N_2 \left( 1 + \frac{1}{2} \sin \theta_2 Q \right) \quad (4)$$

[0086] 磁性介质中各个方向的折射光仍旧遵守斯涅耳定律,将不同折射角的三角函数都用 $\theta_2$ 来表示,以此来简化公式中的三角函数表达式。经简化后的公式(3)可写为下式:

$$[0087] \quad \mathbf{E}_{2S}^i = \mathbf{E}_{2x}^{(1)} + \mathbf{E}_{2x}^{(2)}$$

$$[0088] \quad \mathbf{E}_{2S}^r = \mathbf{E}_{2x}^{(3)} + \mathbf{E}_{2x}^{(4)}$$

$$[0089] \quad \mathbf{E}_{2P}^i = -i\mathbf{E}_{2x}^{(1)} + i\mathbf{E}_{2x}^{(2)}$$

$$[0090] \quad \mathbf{E}_{2P}^r = i\mathbf{E}_{2x}^{(3)} - i\mathbf{E}_{2x}^{(4)} \quad (5)$$

[0091] 根据几何关系,综合可分析可得空气与磁性介质界面上总体电场x、y分量的表达式:

$$\mathbf{E}_{2x} = \sum_{j=1}^4 \mathbf{E}_{2x}^{(j)} = \mathbf{E}_{2s}^i + \mathbf{E}_{2s}^r$$

$$\begin{aligned} [0092] \quad \mathbf{E}_{2y} = \sum_{j=1}^4 \mathbf{E}_{2y}^{(j)} = & -\frac{i \sin \theta_2}{2 \cos \theta_2} Q (1 + \cos^2 \theta_2) \mathbf{E}_{2s}^i + \cos \theta_2 \mathbf{E}_{2p}^i \\ & + \frac{i \sin \theta_2}{2 \cos \theta_2} Q (1 + \cos^2 \theta_2) \mathbf{E}_{2s}^r - \cos \theta_2 \mathbf{E}_{2p}^r \end{aligned} \quad (6)$$

[0093] 为获得介质边界矩阵A,还需要对磁性介质边界磁场分量 $H_x, H_y$ 与P矩阵元素之间的关系进行推导分析。由 $H=NE$ ,可得到 $H^{(j)}$  ( $j=1, 2, 3, 4$ ) 各分量的表达式(其中N为各个折射光传播方向上的复折射率),总结可得,空气与磁性介质界面上总体磁场x、y分量的表达式如下所示:

$$\mathbf{H}_{2x} = \sum_{j=1}^4 \mathbf{H}_{2x}^{(j)} = \frac{i}{2} N_2 \sin \theta_2 Q \mathbf{E}_{2s}^i - N_2 \mathbf{E}_{2p}^i + \frac{i}{2} N_2 \sin \theta_2 Q \mathbf{E}_{2s}^r - N_2 \mathbf{E}_{2p}^r$$

$$\begin{aligned} [0094] \quad \mathbf{H}_{2y} = \sum_{j=1}^4 \mathbf{H}_{2y}^{(j)} = & N_2 \cos \theta_2 \mathbf{E}_{2s}^i + \frac{i}{2} N_2 \frac{\sin \theta_2}{\cos \theta_2} Q \mathbf{E}_{2p}^i \\ & - N_2 \cos \theta_2 \mathbf{E}_{2s}^r - \frac{i}{2} N_2 \frac{\sin \theta_2}{\cos \theta_2} Q \mathbf{E}_{2p}^r \end{aligned} \quad (7)$$

[0095] 经过一系列推导并得到公式(6)和公式(7)后,由它们可以获得两介质的界面场矩阵 $F_2$ 与 $P_2$ 矩阵的关系矩阵,即磁性介质边界矩阵 $A_2$ ,如下所示:

$$[0096] \quad F_2 = [E_{2x} \ E_{2y} \ H_{2x} \ H_{2y}]^T$$

$$[0097] \quad A_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{i \sin \theta_2}{2 \cos \theta_2} (1 + \cos^2 \theta_2) Q & \cos \theta_2 & \frac{i \sin \theta_2}{2 \cos \theta_2} (1 + \cos^2 \theta_2) Q & -\cos \theta_2 \\ \frac{i}{2} N_2 \sin \theta_2 Q & -N_2 & \frac{i}{2} N_2 \sin \theta_2 Q & -N_2 \\ N_2 \cos \theta_2 & \frac{i}{2} N_2 \frac{\sin \theta_2}{\cos \theta_2} Q & -N_2 \cos \theta_2 & -\frac{i}{2} N_2 \frac{\sin \theta_2}{\cos \theta_2} Q \end{pmatrix} \quad (8)$$

[0098] 将 $Q=0$ 代入公式(8)中,并将公式(8)中的 $\theta_2$ 替换为 $\theta_1, N_2$ 替换为 $N_1$ ,即可得到空气层的边界矩阵 $A_1$ ;将 $Q=0$ 代入公式(8)中,并将公式(8)中的 $\theta_2$ 替换为 $\theta_3, N_2$ 替换为 $N_3$ ,即可得到基底层的边界矩阵 $A_3$ ;因此,三介质系统中的非磁性介质的边界矩阵,即空气层和基底层的边界矩阵 $A_1, A_3$ 表达式为:

$$[0099] \quad A_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \cos \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 \\ 0 & -N_1 & 0 & -N_1 \\ N_1 \cos \theta_1 & 0 & -N_1 \cos \theta_1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$[0100] \quad \mathbf{A}_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \cos \theta_3 & 0 & -\cos \theta_3 \\ 0 & -N_3 & 0 & -N_3 \\ N_3 \cos \theta_3 & 0 & -N_3 \cos \theta_3 & 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

[0101] 接下来,根据建立的纵向磁光克尔效应的介电张量及磁性薄膜的介质边界矩阵 $\mathbf{A}_2$ 推导磁性材料的介质特征矩阵 $\mathbf{C}$ ,具体过程如下:

[0102] 平面波 $E_x^{(j)}(z)$  ( $j=1,2,3,4$ )在磁性薄膜介质中从 $z=0$ 到 $z=d$ 传播的相位延迟关系表达式如公式(10)所示:

$$[0103] \quad E_{2x}^{(j)}(0) = \exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda} N_2^{(j)} d \cos \theta_2^{(j)}\right) E_{2x}^{(j)}(d), j=1,2,3,4 \quad (10)$$

[0104] 根据公式(5)可以得到每条折射光电场沿 $x$ 方向分量的矩阵与 $\mathbf{P}$ 矩阵的关系,结合公式(10)可以得到 $\mathbf{P}_2(0) = \mathbf{D}\mathbf{P}_2(d)$ 中的介质传输矩阵 $\mathbf{D}$ :

$$[0105] \quad \mathbf{D} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \varphi^{(1)} + \varphi^{(2)} & i\varphi^{(1)} - i\varphi^{(2)} & 0 & 0 \\ -i\varphi^{(1)} + i\varphi^{(2)} & \varphi^{(1)} + \varphi^{(2)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \varphi^{(3)} + \varphi^{(4)} & -i\varphi^{(3)} + i\varphi^{(4)} \\ 0 & 0 & i\varphi^{(3)} - i\varphi^{(4)} & \varphi^{(3)} + \varphi^{(4)} \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$[0106] \quad \text{其中, } \varphi^{(j)} = \exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda} N_2^{(j)} d \cos \theta_2^{(j)}\right), j=1,2,3,4。$$

[0107] 将式中的 $N_x^{(j)} \cos \theta_2^{(j)}$ 用薄膜无磁情况下的复折射率 $N_2$ 、折射角 $\theta_2$ 的三角函数以及磁光耦合系数 $Q$ 来表示,并结合三角函数变换的方法简化表达式,最终可以将介质传输矩阵 $\mathbf{D}$ 写成如下公式(12)的表达形式:

$$[0108] \quad \mathbf{D} = \begin{pmatrix} U \cos \sigma & U \sin \sigma & 0 & 0 \\ -U \sin \sigma & U \cos \sigma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & U^{-1} \cos \sigma & -U^{-1} \sin \sigma \\ 0 & 0 & U^{-1} \sin \sigma & U^{-1} \cos \sigma \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$[0109] \quad \text{其中, } U = \exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda} d N_2 \cos \theta_2\right), \sigma = \frac{\pi}{\lambda} d N_2 \frac{\sin \theta_2}{\cos \theta_2} Q。$$

[0110] 根据 $\mathbf{F}_2(0) = \mathbf{A}_2 \mathbf{D} \mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{F}_2(d)$ ,已知磁性介质边界矩阵 $\mathbf{A}_2$ 和磁性介质传输矩阵 $\mathbf{D}$ ,可以得到介质特征矩阵 $\mathbf{C}$ 。其中 $\sigma$ 中含有 $Q$ , $\sigma$ 表达式的前半部分 $\frac{\pi}{\lambda} d N_2 \frac{\sin \theta_2}{\cos \theta_2}$ 在磁性薄膜厚度 $d$ 较

小时(小于40nm)远小于1,在本实施例中薄膜厚度为87nm,该部分也是一个较小值,因此 $\sigma \ll 1$ ,则 $\sin \sigma \approx \sigma, \cos \sigma \approx 1$ ,且含有 $\sigma^2$ 以及 $\sigma Q$ 乘积的项做忽略处理:

$$[0111] \quad \mathbf{C} = \begin{pmatrix} c & -\frac{\sin \theta_2 s Q}{2 \cos^3 \theta_2} + \frac{\sigma c}{\cos \theta_2} & i \frac{\sigma s}{N_2} & -i \frac{s}{N_2 \cos \theta_2} \\ -\frac{\sin \theta_2 s Q}{2 \cos \theta_2} - \cos \theta_2 \sigma c & c & i \frac{\cos \theta_2 s}{N_2} & i \frac{\sigma s}{N_2} \\ -i N_2 \sigma s & i \frac{N_2 s}{\cos \theta_2} & c & -\frac{\sin \theta_2 s Q}{2 \cos^3 \theta_2} + \frac{\sigma c}{\cos \theta_2} \\ -i \cos \theta_2 N_2 s & -i N_2 \sigma s & -\frac{\sin \theta_2 s Q}{2 \cos \theta_2} - \cos \theta_2 \sigma c & c \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$[0112] \quad \text{其中, } c = \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} d N_2 \cos \theta_2\right), s = \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} d N_2 \cos \theta_2\right)。$$

[0113] 接着,根据所计算的边界矩阵和磁性薄膜的介质特征矩阵C推导NFO单层磁性薄膜系统的传输矩阵T,  $T = A_1 C^1 A_3$ ; T矩阵表达形式十分复杂,不做直接计算处理。

[0114] 将NFO单层磁性薄膜系统的传输矩阵T分成G、H、I、J四个块矩阵,表达如下:

$$[0115] \quad \mathbf{T} = \begin{pmatrix} \mathbf{G} & \mathbf{H} \\ \mathbf{I} & \mathbf{J} \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$[0116] \quad \text{反射矩阵可由 } \mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{SS} & r_{SP} \\ r_{PS} & r_{PP} \end{pmatrix} = \mathbf{I} \mathbf{G}^{-1} \text{ 得到;}$$

[0117] 其中四个反射系数 $r_{SS}$ 、 $r_{PS}$ 、 $r_{SP}$ 和 $r_{PP}$ 分别表示入射S光到反射S光的反射系数、入射S光到反射P光的反射系数、入射P光到反射S光的反射系数,以及入射P光到反射P光的反射系数;

[0118] 在本实施例中,NFO薄膜厚度为87nm,是一个较厚薄膜,不存在 $\frac{2\pi}{\lambda} d |N_2| \ll 1$ 这个关系,也就无法采用现有方法的 $c \approx 1, s = \frac{2\pi}{\lambda} d N_2 \cos \theta_2$ 这个简化。因此,在本实施例推导

反射系数 $r_{SS}$ 、 $r_{PP}$ 、 $r_{PS}$ 、 $r_{SP}$ 的过程中, $c = \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} d N_2 \cos \theta_2\right), s = \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} d N_2 \cos \theta_2\right)$ 保持完整表达不做简化,从而可以实现铁氧体磁性薄膜的准确磁光椭偏分析;基于此,本实施例中,获得NFO单层薄膜系统的反射系数 $r_{SS}$ 、 $r_{PP}$ 、 $r_{PS}$ 、 $r_{SP}$ 的表达式如下:

$$[0119] \quad r_{SS} = \frac{N_1 N_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 c - N_2 N_3 \cos \theta_2 \cos \theta_3 c - i N_1 N_3 \cos \theta_1 \cos \theta_3 s + i N_2^2 \cos^2 \theta_2 s}{N_1 N_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 c + N_2 N_3 \cos \theta_2 \cos \theta_3 c - i N_1 N_3 \cos \theta_1 \cos \theta_3 s - i N_2^2 \cos^2 \theta_2 s}$$

$$[0120] \quad r_{PP} = \frac{N_2 N_3 \cos \theta_1 \cos \theta_2 c - N_1 N_2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 c - i N_2^2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 s + i N_1 N_3 \cos^2 \theta_2 s}{N_2 N_3 \cos \theta_1 \cos \theta_2 c + N_1 N_2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 c - i N_2^2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 s - i N_1 N_3 \cos^2 \theta_2 s}$$

$$\begin{aligned}
r_{SP} &= \frac{N_1^2 \cos \theta_1 \sin \theta_1 Q}{\left( N_1 N_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 c + N_2 N_3 \cos \theta_2 \cos \theta_3 c - i N_1 N_3 \cos \theta_1 \cos \theta_3 s - i N_2^2 \cos^2 \theta_2 s \right)} \\
&\times \frac{\left( \frac{2\pi}{\lambda} d N_2^2 N_3 \cos^3 \theta_2 - \frac{2\pi}{\lambda} d N_2^2 N_3 \cos \theta_2 \cos^2 \theta_3 + N_2 N_3 \cos^2 \theta_2 c s \right)}{\left( i N_1 N_3 \cos^2 \theta_2 s + i N_2^2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 s - N_1 N_2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 c - N_2 N_3 \cos \theta_1 \cos \theta_2 c \right) \cos \theta_2} \\
&= -r_{PS}
\end{aligned} \tag{15}$$

[0122] 接着,根据公式(15)将NFO薄膜的复磁光耦合系数用反射系数、光学参数、入射角、折射角、薄膜厚度表示:

$$\begin{aligned}
Q &= r_{SP} \left( N_1 N_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 c + N_2 N_3 \cos \theta_2 \cos \theta_3 c - i N_1 N_3 \cos \theta_1 \cos \theta_3 s - i N_2^2 \cos^2 \theta_2 s \right) \\
&\times \left( i N_1 N_3 \cos^2 \theta_2 s + i N_2^2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 s - N_1 N_2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 c - N_2 N_3 \cos \theta_1 \cos \theta_2 c \right) \cos \theta_2 \\
&/ \left[ N_1^2 \cos \theta_1 \sin \theta_1 \left( k d N_2^2 N_3 \cos^3 \theta_2 - k d N_2^2 N_3 \cos \theta_2 \cos^2 \theta_3 + N_2 N_3 \cos^2 \theta_2 c s \right) \right]
\end{aligned} \tag{16}$$

[0124] 其中,  $k=2\pi/\lambda$ 表示波数。

[0125] 最后,根据磁光克尔角定义可得磁光克尔偏转角和椭率角与反射系数的关系式,具体地,P光的磁光克尔偏转角 $\varphi'_p$ 和椭率角 $\varphi''_p$ 之间的关系式,以及S光的磁光克尔偏转角 $\varphi'_s$ 和椭率角 $\varphi''_s$ 之间的关系式,如以下公式(17)所示:

$$\varphi'_p + i\varphi''_p = \frac{r_{SP}}{r_{PP}}, \quad \varphi'_s + i\varphi''_s = \frac{r_{PS}}{r_{SS}} \tag{17}$$

[0127] 其中上标为一撇为偏转角,两撇为椭率角;在各关系式中,磁光克尔偏转角和椭率角会分别对应式中的实部和虚部。

[0128] 基于以上分析,在本发明的一个实施例中,提供了一种磁性薄膜的磁光参数表征方法,本实施例中,该磁性薄膜为厚度为87nm的铁酸镍单层磁性薄膜材料,所表征的磁光参数具体包括结构参数、光学参数和磁学参数;结构参数具体包括厚度d;光学参数具体包括复折射率 $N_2(n_2, k_2)$ ,其中 $n_2$ 和 $k_2$ 分别表示磁性薄膜的反射率和吸收率;磁学参数具体包括复磁光耦合系数Q,P光和S光的磁光克尔偏转角 $\varphi'_p$ 和 $\varphi'_s$ ,以及P光和S光的椭率角 $\varphi''_p$ 和 $\varphi''_s$ ;

[0129] 如图3所示,本实施例所提供的磁光参数表征方法具体包括:

[0130] 首先,测量由基底、磁性薄膜及空气所构成的三介质系统的椭偏参数 $\psi$ 、 $\Delta$ 和全穆勒矩阵M;椭偏参数 $\psi$ 、 $\Delta$ 分别表示经过三介质系统的反射光束相对于入射光束的偏振态改变量,即振幅比角和相位差角,具体地,  $\tan(\psi)$  等于入射光振幅与反射光振幅之比,表示反射光相位与入射光相位之差。

[0131] 测量得到全穆勒矩阵M后,本实施例进一步利用全穆勒矩阵M分别计算入射P光到反射P光和反射S光的反射系数 $r_{PP}$ 和 $r_{SP}$ ,以及入射S光到反射P光和反射S光的反射系数 $r_{PS}$ 和

$r_{SS}$ ;具体可利用琼斯矩阵J与穆勒矩阵M的转换关系完成反射系数的计算,计算公式如下:

$$[0132] \quad \mathbf{M} = \mathbf{A}(\mathbf{J} \otimes \mathbf{J}^*)\mathbf{A}^{-1}, \quad \mathbf{J} = \begin{pmatrix} r_{PP} & r_{PS} \\ r_{SP} & r_{SS} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & i & -i & 0 \end{pmatrix} \quad (18)$$

[0133] 其中,J表示琼斯矩阵, $J^*$ 表示J的复共轭;

[0134] 在实际计算中可以将反射系数 $r_{SS}$ 、 $r_{PP}$ 、 $r_{PS}$ 、 $r_{SP}$ 用全穆勒矩阵M中的元素表示,如式(19)所示:

$$[0135] \quad r_{SP} = -\frac{\frac{M_{13} + M_{23}}{2} - \frac{M_{14} + M_{24}}{2} i}{r_{PP}^*} \quad (19)$$

[0136] 全穆勒矩阵M是一个 $4 \times 4$ 大小的矩阵,其元素以M表示,下标表示行号和列号;上述公式(19)中, $M_{13}$ 、 $M_{23}$ 、 $M_{14}$ 、 $M_{24}$ 分别表示第1行第3列的元素、第2行第3列的元素、第1行第4列的元素和第2行第4列的元素;

[0137] 通过本实施例的磁光椭圆系统测量得到的穆勒矩阵是归一化的穆勒矩阵,因此将反射系数 $r_{SP}$ 用归一化的穆勒矩阵元素表示:

$$[0138] \quad r_{SP} = -\frac{\frac{M_{13}^{norm} + M_{23}^{norm}}{2} - \frac{M_{14}^{norm} + M_{24}^{norm}}{2} i}{r_{PP}^*} M_{11} \quad (20)$$

[0139] 其中,上标“norm”表示归一化的穆勒矩阵中的元素;

$M_{11} = \frac{1}{2}(|r_{PP}|^2 + |r_{SS}|^2 + |r_{SP}|^2 + |r_{PS}|^2) \approx \frac{1}{2}(|r_{PP}|^2 + |r_{SS}|^2)$ ,  $r_{PS}$ 、 $r_{SP}$ 为极小值不保留其二阶项。

[0140] 测量得到椭圆参数 $\psi$ 、 $\Delta$ 之后,本实施例进一步利用椭圆参数 $\psi$ 、 $\Delta$ 进行椭圆分析,以获得厚度d和复折射率 $N_2$  ( $n_2$ 、 $k_2$ );具体通过反演拟合即可得到厚度d和复折射率 $N_2$  ( $n_2$ 、 $k_2$ )。

[0141] 完成结构参数和光学参数的表征后,本实施例进一步利用所计算的反射系数及椭圆分析结果计算复磁光耦合系数Q,并计算磁光克尔偏转角 $\phi'_p$ 和 $\phi'_s$ ,以及椭圆率角 $\phi''_p$ 和 $\phi''_s$ ;

[0142] 本实施例中,计算复磁光耦合系数Q的公式即为上述公式(16),计算磁光克尔偏转角和椭圆率角的公式即为上述公式(17);为了进一步提高磁光参数表征的通用性和精度,本实施例在利用公式(17)计算磁光克尔偏转角和椭圆率角之前,会先根据结构参数、光学参数、复磁光耦合系数Q与反射系数之间的关系,对反射系数进行更新,即利用上述公式(15)对四个反射系数 $r_{SS}$ 、 $r_{PP}$ 、 $r_{PS}$ 、 $r_{SP}$ 进行更新,之后利用更新后的反射系数按照上述公式(17)计算计算磁光克尔偏转角 $\phi'_p$ 和 $\phi'_s$ ,以及椭圆率角 $\phi''_p$ 和 $\phi''_s$ 。

[0143] 置于外加磁场中的磁性材料的 $r_{PP}$ 和 $r_{SS}$ 与无磁场情况下的几乎一样。因此,各向同性材料椭圆分析的方法用于分析置于磁场中的NFO磁性薄膜也可以获得其在无磁情况下的

光学常数以及薄膜厚度。

[0144] 总体而言,本实施例在计算磁性薄膜的复磁光耦合系数 $Q$ ,以及磁光克尔偏转角和椭率角是,计算公式中直接保留了 $\frac{2\pi}{\lambda}dN_2 \cos\theta_2$ 项,而未对该项进行简化,因此,在磁性薄

膜厚度较大(>40nm)时,仍然能够准确表征包括复磁光耦合系数 $Q$ 、磁光克尔偏转角、椭率角在内的磁光参数,其适用性更强,对于铁氧体磁性薄膜这一类具有较大的厚度分布范围的磁性薄膜,也能精确表征其磁光参数;本实施例所表征的磁光参数同时包括结构参数、光学参数和磁学参数,对测量对象无损,测量过程快速高效且能获得多种信息;此外,本实施例所搭建的磁光椭偏测量装置可以调节非常大的磁场范围(0~350mT),能使大多数的磁性薄膜材料达到饱和磁化强度,且测量光谱范围大(193nm~1690nm),因此,能够获得更多的光谱磁光参数。

[0145] 容易理解的是,对于其他厚度或材质的磁性薄膜,例如厚度小于40nm的金属磁性薄膜,本实施例所提供的磁光参数表征方法同样适用,更多的示例在此将不做复述。

[0146] 实施例2:

[0147] 一种磁性薄膜的磁光参数表征系统,本实施例中,该磁性薄膜为厚度为87nm的铁酸镍单层磁性薄膜材料,所表征的磁光参数具体包括结构参数、光学参数和磁学参数;结构参数具体包括厚度 $d$ ;光学参数具体包括复折射率 $N_2(n_2, k_2)$ ,其中 $n_2$ 和 $k_2$ 分别表示磁性薄膜的反射率和吸收率;磁学参数具体包括复磁光耦合系数 $Q$ ,P光和S光的磁光克尔偏转角 $\varphi'_p$ 和 $\varphi'_s$ ,以及P光和S光的椭率角 $\varphi''_p$ 和 $\varphi''_s$ ;

[0148] 本实施例具体包括:磁光椭偏测量装置、椭偏分析模块以及磁学参数表征模块;

[0149] 磁光椭偏测量装置,用于测量由基底、磁性薄膜及空气所构成的三介质系统的椭偏参数 $\psi$ 、 $\Delta$ 和全穆勒矩阵 $M$ ;椭偏参数 $\psi$ 、 $\Delta$ 分别表示经过三介质系统的反射光束相对于入射光束的振幅比角和相位差角;本实施例中,磁光椭偏测量装置由宽光谱穆勒矩阵椭偏仪和磁场加载模块搭建而成;

[0150] 椭偏分析模块,用于利用全穆勒矩阵 $M$ 分别计算入射P光到反射P光和反射S光的反射系数 $r_{PP}$ 和 $r_{SP}$ ,以及入射S光到反射P光和反射S光的反射系数 $r_{PS}$ 和 $r_{SS}$ ,并利用椭偏参数 $\psi$ 、 $\Delta$ 进行椭偏分析,以获得厚度 $d$ 和复折射率 $N_2(n_2, k_2)$ ;

[0151] 磁学参数表征模块,用于利用所计算的反射系数及椭偏分析结果按照上述公式(16)计算复磁光耦合系数 $Q$ ,并按照上述公式(17)计算磁光克尔偏转角 $\varphi'_p$ 和 $\varphi'_s$ ,以及椭率角 $\varphi''_p$ 和 $\varphi''_s$ ;

[0152] 本实施例中,各模块的具体实施方式可参考上述方法实施例,即上述实施例1中的描述,在此将不做复述。

[0153] 本领域的技术人员容易理解,以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

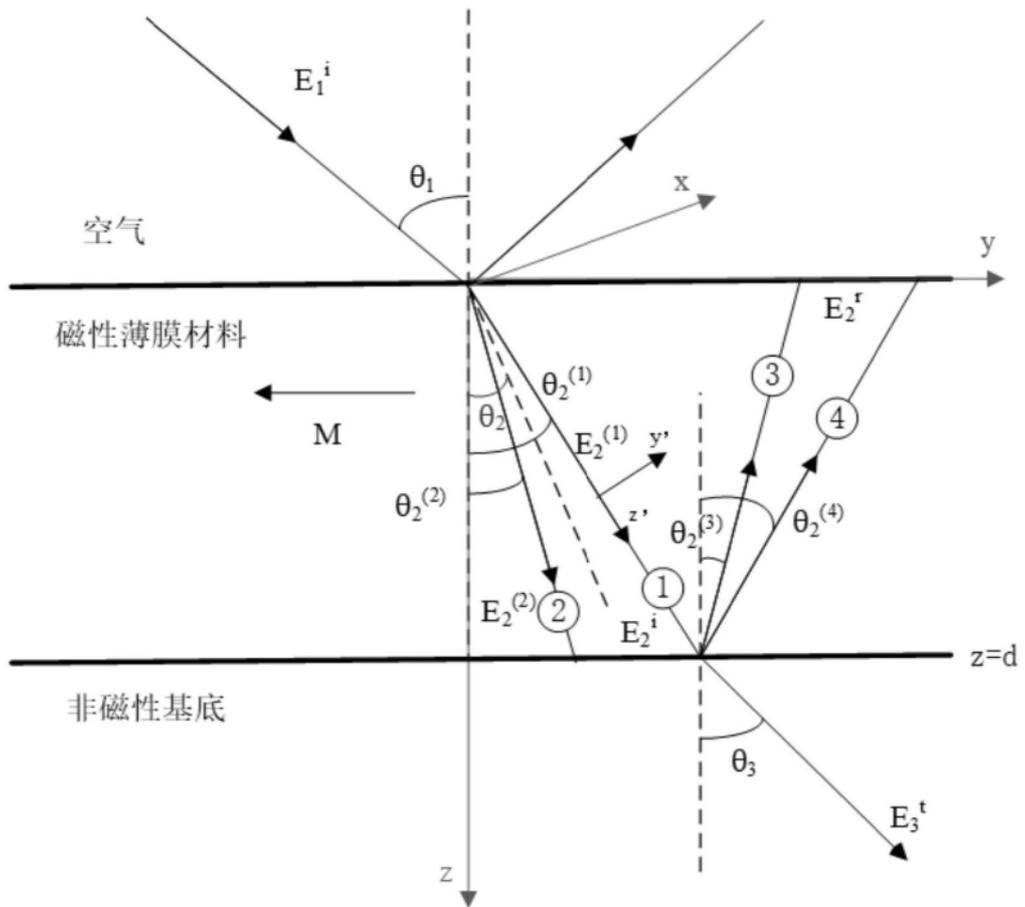


图1

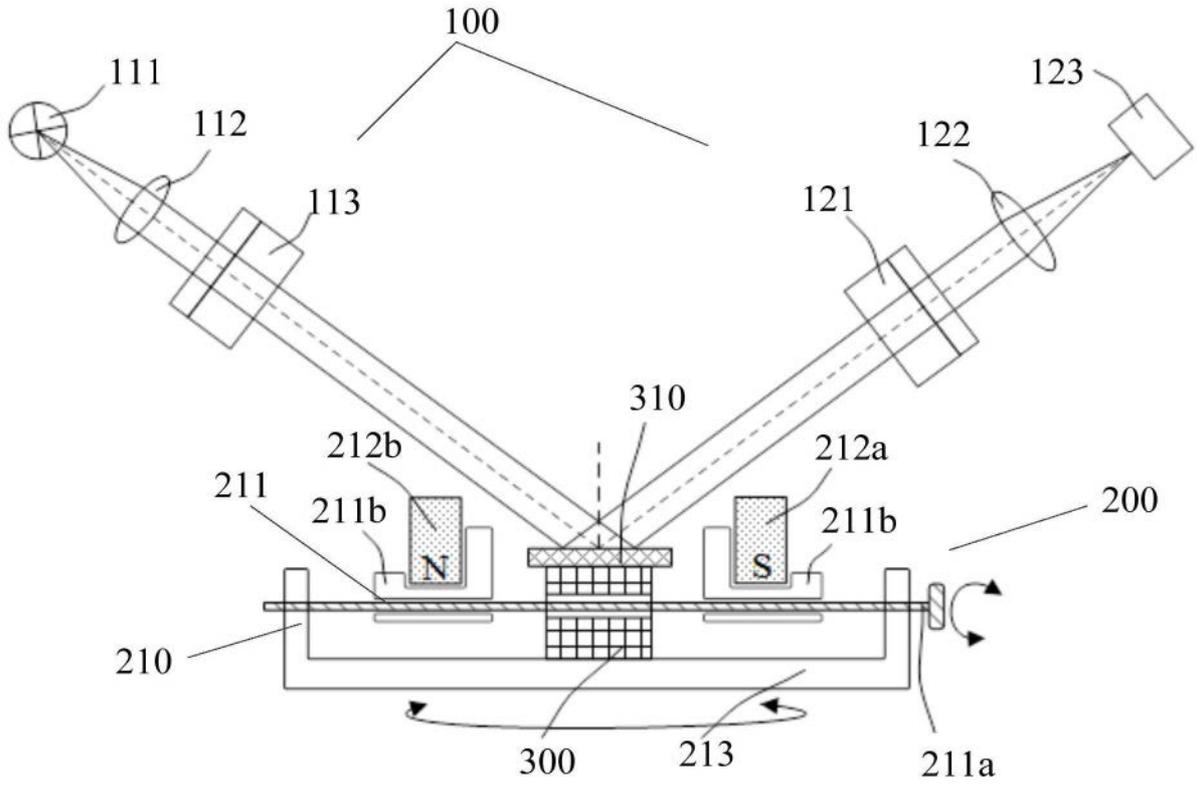


图2

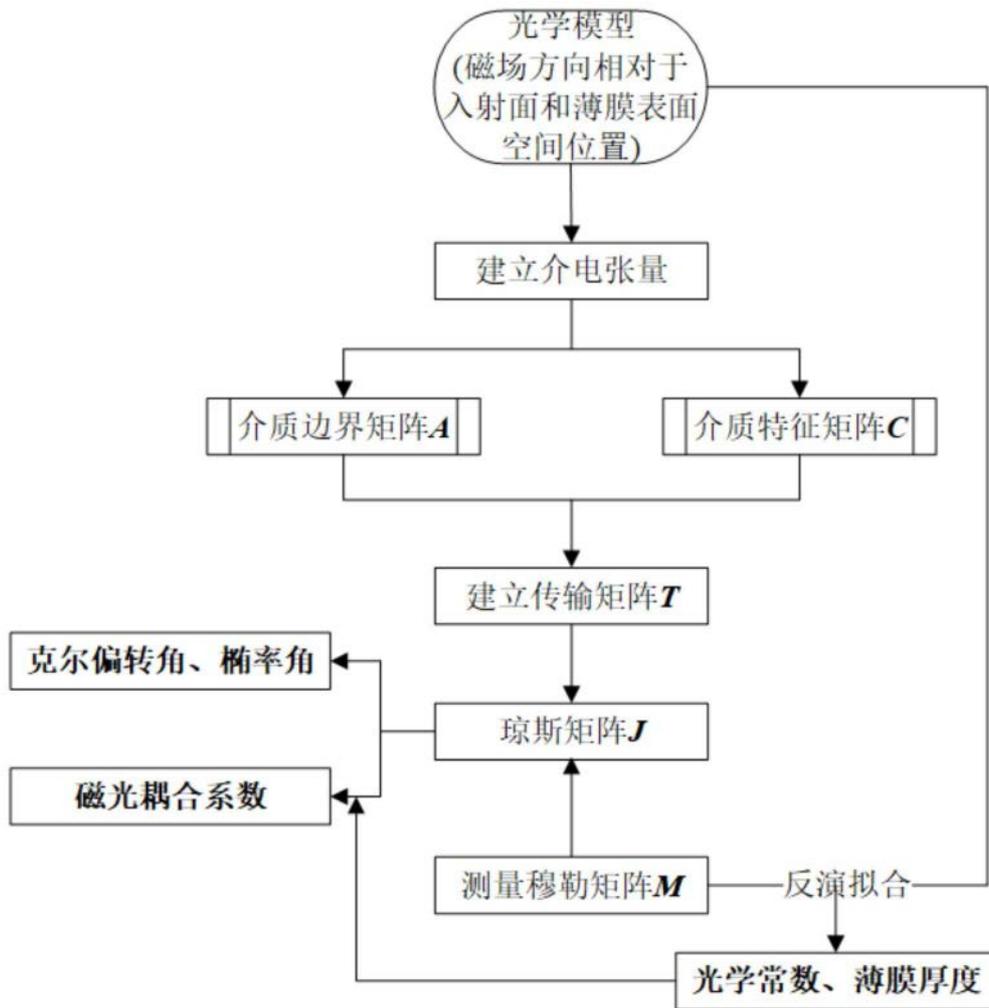


图3