

GdFeCo 磁光薄膜飞秒激光感应反常磁滞回线研究*

徐初东¹, 陈如麒², 朱贵文³, 熊万杰¹

(1. 华南农业大学理学院应用物理系, 广东 广州 510642;

2. 华南农业大学公共基础课实验教学中心, 广东 广州 510642;

3. 广东药学院基础学院, 广东 广州 510006)

摘要: 该文使用飞秒时间分辨泵浦-探测磁光克尔光谱技术, 研究了飞秒激光加热 GdFeCo 磁光薄膜跨越铁磁补偿温度时, 净磁矩方向发生转变而引起磁化反转的反常克尔磁滞回线。通过测量不同激发功率下以及不同泵浦脉冲数下的反常克尔回线, 揭示反常回线包含连续脉冲激发产生的积累效应以及外场磁化史的记忆效应, 对反常回线的形成起源做了深入探索和详细研究。研究结果对于深入理解 GdFeCo 合金薄膜中稀土-过渡金属间的反铁磁耦合特性以及磁化反转的机理具有重要意义。

关键词: 反常克尔回线; 磁化反转; GdFeCo; 泵浦-探测

中图分类号: 0482.5 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2013)05-0103-04

Study of Anomalous Hysteresis Loops Induced by Femtosecond Laser Pulses in GdFeCo Film

XU Hudong¹, CHEN Ruqi², ZHU Guiwen³, XIONG Wanjie¹

(1. College of Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

2. Center of Experimental Teaching for Common Basic Courses, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

3. School of Basic Courses, Guangdong Pharmaceutical University; Guangzhou 510006, China)

Abstract: The time-resolved pump-probe magneto-optical Kerr technique was used to study the GdFeCo films excited by femtosecond laser. The anomalous Kerr loops were observed, owing to the fact that the sample temperature passed through the ferromagnetic compensation temperature and then caused the change of the direction of net magnetic moment. The anomalous Kerr loops, which were obtained under different pump fluence and different amount of pump pulses, were revealed contained accumulation effect from continuous pulses pump and memory effect from external magnetic field history. The origin of anomalous loops was studied in depth. The results were important to further understand the antiferromagnetic coupling property between rare earth sub-lattice and transition metal sub-lattice in GdFeCo and the mechanism of magnetization reversal.

Key words: anomalous Kerr loops; magnetization reversal; GdFeCo; pump-probe

鉴于发展超快磁光记录的需要, GdFeCo, TbFeCo 等稀土 (RE) - 过渡 (TM) 金属磁光薄膜材料由于其所特有的铁磁补偿温度的性质, 可以实现不同于传统居里点写入的热辅助磁记录和潜在

更快的磁化反转速度, 引起研究者的强烈兴趣^[1-5]。其中 Rasing 小组^[3]通过飞秒激光超快加热 GdFeCo 磁光薄膜, 测得了与常规的磁滞回线形状明显不同的反常回线, 并以此作为样品温度跨越

* 收稿日期: 2013-04-08

基金项目: 国家自然科学基金科学部主任专项基金资助项目 (11247015)

作者简介: 徐初东 (1979 年生), 男; 研究方向: 光学工程; 通讯作者: 朱贵文; E-mail: gdpuzgw@163.com

磁化补偿温度的直接证据。在文中,作者虽然对反常回线作了初步的解释,然而对回线的具体产生缘由没有提及。本文对反常回线形成起源做出详细研究,其结果对磁光记录材料的实际应用具有重要的指导意义。

本文利用飞秒时间分辨磁光克尔泵浦-探测技术测量了 GdFeCo 磁光薄膜的激光感应反常克尔回线,对其回线的演化和形成进行详细地研究。

1 实验描述

脉冲宽度约 150 fs, 中心波长 800 nm, 脉冲序列的重复频率为 1.14 kHz 的线偏振飞秒激光脉冲序列由钛宝石飞秒激光器产生,经由钛宝石再生放大器放大并输出进入实验光路,经分束片分为泵浦光和探测光。其中泵浦光通过可控光学延迟线,控制与探测光之间的时间延迟。经延迟的泵浦光和探测光再经凸透镜聚焦到样品的同一点上,其中泵浦光垂直入射,而探测光以小角度入射。实验过程,设置泵浦与探测光强度比大于 40, 泵浦光斑尺寸与探测光斑尺寸比大于 2。从样品反射的探测光的极克尔转角由光电对管组成的平衡光桥进行测量,差分输出信号由锁相放大器放大、检测。测量过程中,光学斩波器以约 340 Hz 频率调制探测光,并同步锁相放大器。

本文研究的 GdFeCo 样品采用磁控溅射方法制备,具有以下多层结构: glass/Al (10 nm)/SiN (5 nm)/Gd_{23.5}Fe_{73.2}Co_{3.3} (30 nm)/SiN (20 nm), 其中 glass 层作为基底, Al 层作为散热衬底层, 上下两层的 SiN 层作为保护层, 同时保证 GdFeCo 薄膜层两侧的边界条件一致 GdFeCo 层具有较强的垂直磁各向异性, 居里温度约为 510 K, 磁化补偿温度约为 400 K。

2 实验结果与讨论

利用飞秒时间分辨磁光克尔泵浦-探测技术测量 GdFeCo 磁光薄膜极克尔回线, 如图 1 所示。其中黑线为没有泵浦光作用的克尔回线 (No pump), 与用传统磁学方法测量的磁滞回线形状相似, 并且形状方正, 表征样品具有高的垂直磁晶各向异性。方块线和圆点线表示外场扫描方向不同时泵浦激光感应的磁滞回线, 对应激发脉冲能量密度为 8 mJ/cm²。图 1 中探测时刻为 -5 ps 表示探测光比泵浦光先到达, 相当于上一个泵浦脉冲激发后约一个脉冲周期时间 0.88 ms。

激光感应回线的“反常”体现在从图中原来

的“B”部分反转到了“B'”部分。反常克尔回线显示出两个矫顽力, 为了区分, 把无激光作用的克尔回线的矫顽力称为室温矫顽力 (H_C^{RT}); 而反常克尔回线中外环的矫顽力称为暖矫顽力 (H_C^{warm}), 表示激光作用下材料经过 0.88 ms 的延迟时间后, 对应热平衡温度下的稳态矫顽力。内环的矫顽力称为热矫顽力 (H_C^{hot}), 以往通常被认为是激光辅助使材料矫顽力减小所能达到的最小值, 即磁光记录中的最小写入磁场^[3]。

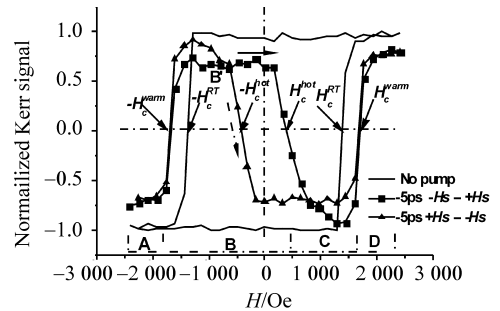


图 1 GdFeCo 薄膜的磁光克尔磁滞回线

Fig. 1 Magneto-optical Kerr hysteresis loops of GdFeCo film

2.1 反常克尔回线起源

把反常克尔回线按外加磁场的数值范围分成以下四部分进行分段研究, 以外场的扫描方向从负饱和和磁场至正饱和和磁场所得的回线进行具体分析。需要强调的是, 800 nm 探测光波的磁光克尔信号反映的主要是 TM 磁矩的状态^[10]。

外场的范围处于负向暖矫顽力 ($-H_C^{warm}$) 至负饱和和场部分, 对应图 1 反常克尔回线的 A 部分。在此部分, 样品的磁化态在激光泵浦后实际经历了两次磁化反转过程。外场从负饱和和场开始往正方向扫描, 泵浦脉冲到达前, 样品处于负饱和磁化态。泵浦脉冲的作用使激发区域迅速升温并跨越磁化补偿温度 (T_M), 系统的磁化态由原来的 $|M_{RE}| > |M_{TM}|$ 变为 $|M_{RE}| < |M_{TM}|$, 总磁矩反向; 由于此处的外场大于样品此时对应温度下的矫顽力, 所以在外场作用下样品发生第一次磁化反转, 从负饱和和态反转到正饱和和态。随后, 激发区域随着热扩散的进行, 样品温度逐渐降低, 当温度低于磁化补偿温度 (T_M) 后, 系统的磁化态又变回 $|M_{RE}| > |M_{TM}|$ 的状态。此时外场仍大于暖矫顽力, 故样品在外场作用下再次发生磁化反转, 从正饱和和态再反转回初始的负饱和和态, 与 No pump 回线的这部分保持相同的磁化态。

外场范围处于负向暖矫顽力 ($-H_C^{warm}$) 至正

向热矫顽力部分 ($+H_C^{hot}$), 对应图 1 反常克尔回线的 B 部分。在此部分, 样品的磁化态在激光泵浦后经历一次磁化反转后的维持状态。激光脉冲到达前, 样品同样处于负饱和态。泵浦脉冲的作用使样品温度跨越磁化补偿温度 (T_M), 总磁矩反向; 由于此处的外场大于样品此温度下对应的热矫顽力, 所以在外场作用下, 样品从负饱和态反转到正饱和态。随后, 激发区域随着热扩散的进行, 样品的温度逐渐降低至低于磁化补偿温度 (T_M) 后, 系统的磁化状态又变回 $|M_{RE}| > |M_{TM}|$ 的状态。但由于此处的外场小于此时温度下对应的暖矫顽力, 所以样品不再发生磁化反转, 对应的磁化态被保持下来。与 No pump 回线环的这部分磁化态对比, 出现了图 1 中原来的“B”部分反转到了“B'”部分的磁化反转。

外场范围处于正向热矫顽力 ($+H_C^{hot}$) 至正向暖矫顽力 ($+H_C^{warm}$) 部分, 对应图 1 反常克尔回线 C 部分。在此部分, 样品的磁化态在飞秒激光泵浦后没有经历磁化反转过程。在激光脉冲到达前, 系统总磁矩与外磁场反向, 激光激发使样品温度跨越磁化补偿温度 (T_M), 总磁矩变为与外场同向, 虽然此处的外场大于热矫顽力, 但由于此时的磁矩与外场方向相同, 因而磁化态不反转。当热扩散后, 温度低于磁化补偿温度后, 由于此处的外场小于此时温度下对应的暖矫顽力, 因而样品也不发生磁化反转。

外场范围处于大于正向暖矫顽力 ($+$) 至正饱和场部分, 对应图 1 反常克尔回线 D 部分。在此部分, 样品的磁化态在飞秒激光泵浦后发生的过程和回线环的 A 部分相似, 同样经历了两次磁化反转过程后回到初始的正饱和磁化态。

2.2 反常克尔回线包含的信息

以上是对反常克尔回线起源的初步解释, 而对于反常克尔回线包含的一些细节信息, 我们进一步测量了不同激发功率下 -5 ps 反常克尔回线, 如图 2 (a) 所示; 以及采用初始化外加磁场的外场扫描方式结合可控泵浦脉冲的探测技术测量的不同泵浦脉冲数下 -5 ps 反常克尔回线, 如图 2 (b) 所示, 进一步对图 1 反常克尔回线的形成起源作深入解析如下。

图 1 中反常克尔回线的暖矫顽力略大于 No pump 回线的室温矫顽力。这是因为激光脉冲的热作用使样品的平衡温度升高, 在经过 0.88 ms 的延迟时间后仍保持温度稍高于室温, 按照 RE-TM 磁光材料矫顽力的温度依赖关系^[11], 样品此时的温

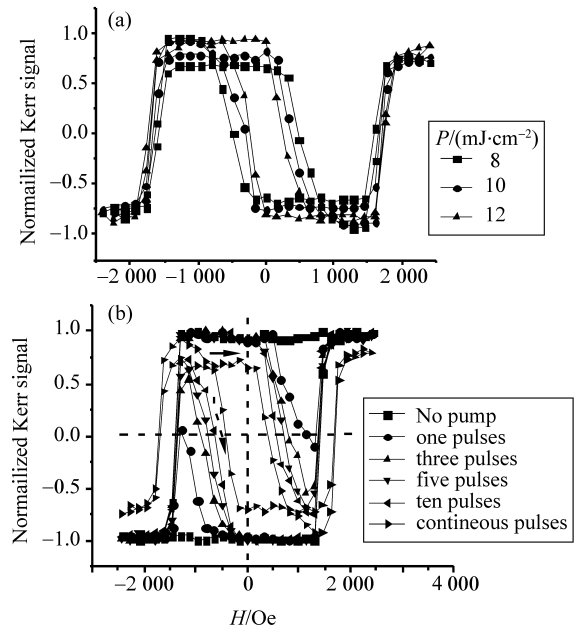


图 2 (a) 不同激发功率的磁光克尔回线

(b) 不同激发脉冲数的磁光克尔回线

Fig. 2 (a) Magneto-optical Kerr loops of GdFeCo amorphous film under different fluencies,

(b) the magneto-optical Kerr loops of GdFeCo amorphous film under different pump pulses

度低于磁化补偿温度 (约为 400 K), 矫顽力随温度升高而增大, 由此体现出此温度下的暖矫顽力略大于室温矫顽力。由图 2 (a) 可以看出, 随激发功率增大, 样品温度升高, 暖矫顽力增大, 也进一步说明样品的温度在磁化补偿温度之下。

在图 1 反常克尔回线中, 相同外场下不同扫描方向所得到回线 B 部分对应的磁化强度不同, 这部分被称为“剩余磁滞现象” (residual hysteresis)^[3]。由于激光脉冲的加热作用不均匀导致在探测区域内温度不均匀, 并不能够保证此时的外加磁场满足大于探测区域内所有温度所对应的矫顽力, 因而出现磁化反转不完全的结果。当进一步加大激发功率之后, 探测区域的温度也随之升高, 对应的热矫顽力也会随之减小, 可以观测到该部分的磁化反转程度也随之增大, 如图 2 (a) 所示。

在图 1 反常克尔回线中, A 部分的饱和磁化强度比 C 部分的饱和磁化强度小。这种差异源于 Gd-FeCo 亚铁磁耦合系统中 RE 与 TM 反平行子系统非完全刚性耦合的特性^[6], 即磁场作用直接驱动 RE 或 TM 磁矩使其完全反转, 并不能保证与之处于被迫反平行耦合的 TM 或 RE 磁矩也随之完全反转。因为在 A 部分, RE 磁矩平行于外磁场, 磁场直接驱动 RE 子系统将其饱和磁化, 而 TM 子系统的磁

化则是通过反平行耦合被迫随之反转的, 所以此处的 TM 磁化反转是不完全的。由于探测到的克尔信号主要反映 TM 子系统的磁化状态, A 部分的饱和磁化强度小于 C 部分, 表明 TM 子系统的被迫磁化反转是不完全的。

反常克尔回线中, 外场小于热矫顽力 H_c^{hot} 的区域本不应发生磁化反转 (如图 2(b) 所示, 为方便对比, 把图 1 的 -5 ps 回线也作在图 2(b) 中, 对应 continuous pulses 回线), 图 1 中方块线本应沿虚线箭头的指示方向运行而不是沿实线箭头方向, 但图 1 中反常克尔回线的这部分区域却仍然出现反常反转。这部分磁化反转源于外场磁化史的记忆效应^[8] (类似于传统的磁滞效应), 是由于样品磁化态的记忆效应保留了先前外场大于热矫顽力 (H_c^{hot}) 的区域反转磁化态。图 2(b) 中采用初始化外场的扫描方式代替外场连续单调变化的扫描方式, 可以消除外场磁化史的记忆效应, 在这部分区域观测不到磁化反转。

在图 1 反常克尔回线 B 部分, 随着外加磁场的增大, 根据此类 RE-TM 磁光材料外加反向磁场作用下, 反向磁畴的形核和畴壁迁移的磁化反转机制^[12], 其磁化反转程度应与外加磁场成正比, 也应随之增大。但是在此部分反转的磁化强度数值却基本保持不变, 此结果的产生源于外场磁化史的记忆效应^[8] 以及连续多脉冲激发所引起的积累效应^[8], 并且随着激发脉冲数增加, 磁化反转程度增加, 如图 2(b) 所示, 最终在连续脉冲激发下达到饱和磁化 (图 2(b) continuous pulses 回线所示)。

图 1 反常克尔回线所表征的热矫顽力 H_c^{hot} 并不是激光辅助使材料矫顽力减小所能达到的最小值, 它是回线包含连续多脉冲激发的积累效应所显示出的虚假信息, 从图 2(b) 可以明显看出, 随激发脉冲数增加, 热矫顽力逐渐减小, 脉冲作用的积累效应很明显。

3 结 论

利用飞秒时间分辨磁光克尔泵浦 - 探测技术测量了 GdFeCo 磁光薄膜的激光感应磁滞回线, 对反常回线的形成原因作了详细的分析, 回线的反常部分源于样品在激光加热后, 温度跨越铁磁补偿温度, 净磁矩方向发生转变而引起的磁化反转, 以及回线所包含的外场磁化史的记忆效应和连续多脉冲激发的积累效应。研究结果对深入理解 GdFeCo 合金薄膜在激光激发后的磁光响应特性以及 RE-TM

系统磁化反转机理具有重要意义。

感谢中山大学物理科学与工程技术学院赖天树教授的指导, 感谢中山大学李树发和广州大学陈志峰博士的讨论, 感谢复旦大学周仕明教授提供的样品。

参考文献:

- [1] JIANG X, GAO L, SUN J Z, et al. Temperature dependence of current-induced magnetization switching in spin valves with a ferrimagnetic CoGd free layer [J]. Phys Rev Lett, 2006, 97: 217202 - 1 - 217202 - 14.
- [2] AESCHLIMANN M, VATERLAUS A, LUTZ M, et al. High-speed magnetization reversal near the compensation temperature of amorphous GdTFe [J]. Appl Phys Lett, 1991, 59: 2189 - 2191.
- [3] STANCIU C D, TSUKAMOTO A, KIMEL A V, et al. Subpicosecond magnetization reversal across ferrimagnetic compensation points [J]. Phys Rev Lett, 2007, 99: 217204 - 1 - 217204 - 4.
- [4] STANCIU C D, HANSTEEN F, KIMEL A V, et al. All-optical magnetic recording with circularly polarized light [J]. Phys Rev Lett, 2007, 99: 047601 - 1 - 047601 - 4.
- [5] VAHAPLAR K, KALASHNIKOVA M A, KIMEL A V, et al. Ultrafast path for optical magnetization reversal via a strongly nonequilibrium state [J]. Phys Rev Lett, 2009, 103: 117201 - 117204.
- [6] 高瑞鑫, 徐振, 陈达鑫, 等. GdFeCo 磁光薄膜中 RE-TM 反铁磁耦合与激光感应超快磁化翻转动力学研究 [J]. 物理学报, 2009, 58: 580 - 584.
- [7] CHEN Z F, GAO R X, WANG Z X, et al. Field-dependent ultrafast dynamics and mechanism of magnetization reversal across ferrimagnetic compensation points in GdFeCo amorphous alloy films [J]. J Appl Phys, 2010, 108: 023902 - 1 - 023902 - 4.
- [8] XU C D, CHEN Z F, CHEN D X, et al. Origin of anomalous hysteresis loops induced by femtosecond laser pulses in GdFeCo amorphous films [J]. Appl Phys Lett, 2010, 96: 092514 - 092516.
- [9] XU C D, CHEN Z F, XU Y, et al. Structure and property changes and femtosecond laser-induced magnetization dynamics of two-year-old high coercive TbFeCo films [J]. J Magn Magn Mater, 2012, 324: 2034.
- [10] KATAYAMA T, MIYAZAKI M, ARIMUNE H, et al. Magnetic properties of multilayered amorphous rare-earth element/transition metal films [J]. J Magn Soc Jpn, 1984, 8: 121 - 123.
- [11] STANCIU C D. Laser-induced femtosecond magnetic recording [D]. PhD Thesis. Institute for Molecules and Materials, Radboud University Nijmegen, 2008.
- [12] HOHLFELD J, GERRITS T, BILDERBEEK M, et al. Fast magnetization reversal of GdFeCo induced by femtosecond laser pulses [J]. Phys Rev: B, 2001, 65: 012413 - 1 - 4.