

混浊介质中的超快光学成像

陈院森

(山西大学量子光学与光量子器件国家重点实验室光电研究所, 山西 太原 030006)

摘要: 基于非线性晶体的电光科尔效应, 简介了混浊介质中的 pump-probe 超快光学科尔门成像技术。超快短脉冲 probe 光经过混浊介质后, 在空间上由于光散射的不同路径造成了在时域上的脉冲展宽。采用高能量密度 pump 光作为门开关控制 probe 光在时域上透射/反射超快动力学过程, 获取的超快弹道光用来实现混浊介质中的物体成像。首次提出了一种新型的科尔门超快光学控制技术: 基于磁性材料中的磁光科尔/法拉第效应, 可以采用低光功率密度的圆偏振光作为 pump 光, 灵活有效地控制 probe 光反射/透射的超快动力学过程, 从而实现高散射介质中的物体成像。

关键词: 超快光学成像; 科尔门; 科尔电光效应; 磁光法拉第/科尔效应; 混浊介质

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2015)S1-0034-04

Ultrafast Optical Imaging through a Turbid Media

CHEN Yuan-sen

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices and Institute of Opto-Electronics,
Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: The ultrafast Kerr-gate optical imaging by means of pump-probe technique through a turbid media is introduced by using Kerr electro-optic effect in nonlinear crystals. During passing through the turbid media, a femto-second optic pulse takes different types of trajectories in real space due to random scatterings, broadening the pulse in the time domain. By using a pump beam of a high energy density as an ultrafast gate to control reflection/transmission dynamics of the probe beam, the obtained ballistic photons of the probe beam can make the ultrafast imaging for an object in the turbid media. For the first time, we propose a new type of ultrafast Kerr-gate optical imaging technique: based on the magneto-optic Kerr/Faraday effect in a magnetic thin film, a circularly polarized pump beam of a much lower power density can be adopted to control the reflection/transmission dynamics of the probe beam for more economical and flexible ultrafast optical imaging.

Key words: ultrafast optical imaging, Kerr-gate, Kerr electro-optic effect, magneto-optic Kerr/Faraday effect, turbid media

0 引言

混浊介质中的成像技术在生物医学、工业检测以及国防安全等科学研究等方面有着重要应用^[1-2]。通过对血液组织的高分辨率成像, 可以确定器官的癌变状况^[3]; 通过对发动机燃料的燃烧动力学过程成像, 可以优化发动机设计, 从而提高其工作效率和动力特性^[4-5]; 在恶劣气候条件下的高分辨率成像(例如高散射海水以及雾霾等), 则可实现对机打目标的高精度定位。因为在血液组织、燃烧气体以及海水等介质中, 可见光以及近红外光均有较强的散射特性, 因此无法用直接成像技术来实现对其中物体的成像。目前, 在混浊介质中的成像技术尚处于研究阶段, 面向实际应用还有不少工程技术难题需要解决^[1]。

如图 1(a)所示, 光在散射介质中, 经过不同路径散射后, 出射光可以分为漫射光(diffuse light), 蛇形光(“snake” light)和弹道光(ballistic light)。其中, 漫射光经过的散射路径最长, 蛇形光次之, 弹道光即为未

收稿日期: 2015-06-15; 修订日期: 2015-11-16。

作者简介: 陈院森(1984-), 男(汉族), 博士, 教授, 研究领域为半导体自旋电子学, 超快光学成像以及微纳器件加工。

E-mail: yuansen.chen@googlemail.com, yuansen.chen@sxu.edu.cn。

基金项目: 山西省基础研究优秀青年基金, 编号: 2015021002。

经历散射的出射光。基于此，超短脉冲光经过散射介质则会发生时域上的脉冲展宽；根据3种光的光程特性可知，弹道光在出射光的最前端，并且强度最弱。为了实现对介质中物体的成像，则需要一个超快光控制门对弹道光进行提取。为了达到高空间分辨率成像，往往需要这个控制门能在1皮秒尺度对光电器件至太赫兹(10^{12} Hz)的电学控制，这样的超快门技术主要是基于非线性光学晶体中的科尔电光效应来实现的。

1 基于科尔电光效应的超快科尔门光学成像

科尔门技术在混浊介质中成像在原理上已经被不少实验证明^[5-7]。相对于直接成像技术，科尔门技术的成像对比度往往优于数倍；并且即使介质散射强度增强，成像质量水平仍然能保持稳定。

图1(a)是基于 pump-probe 科尔门技术对混浊介质中物体进行成像的基本原理图。Pump 和 probe 光是同步光脉冲序列，两者波长可以相同，也可以不相同，目前主要选择飞秒激光脉冲。整个系统的主要核心在于如何精确让经过散射介质后的 probe 光脉冲中的微弱弹道光进入探测器，而不让漫射光和蛇形光被探测到。通过一个线性位移平台可以控制 pump 光和 probe 的相对时间延迟 Δt [时间精度可以达到数10飞秒(10^{-15} s)]，而使两个光脉冲同时抵达科尔晶体。

图1(b)是一种科尔门系统的典型光路设计图。线性偏振器 P1 对 probe 光的偏振态进行控制；通过透镜 L1，probe 光聚焦在科尔晶体中心；经过等焦长的透镜 L2 准直，probe 光通过偏振器 P2，其光强大小被高灵敏度 CCD 系统所探测。在没有 pump 光激发科尔晶体的情况下，通过改变 P2 的方向，可以选择与 probe 光偏振态完全正交的偏振方向，即将 probe 光完全“关”住。为了实现时域上的选择性成像，则需要利用高能量密度的 pump 光对科尔晶体的折射率进行超快控制。Pump 光亦被聚焦科尔晶体中心，产生高强度电场，基于科尔电光效应，晶体的折射率会发生瞬间改变。由于科尔晶体的极化弛豫速率在飞秒时间尺度，因此理论上可以实现飞秒时间尺度的超快门控。由于电光科尔效应，probe 光的偏振态会发生瞬间改变；致使偏振器 P2 不再与 probe 光偏振态完全正交，因此会有部分 probe 光可以通过 P2，进入 CCD 系统。如此以来，实现了对弹道光进行很“干净”的选择。为了消除 pump 光特别是杂散光进入探测系统，在 P2 后面往往会设计共聚焦光阑或者使用滤波片提高成像的信噪比。

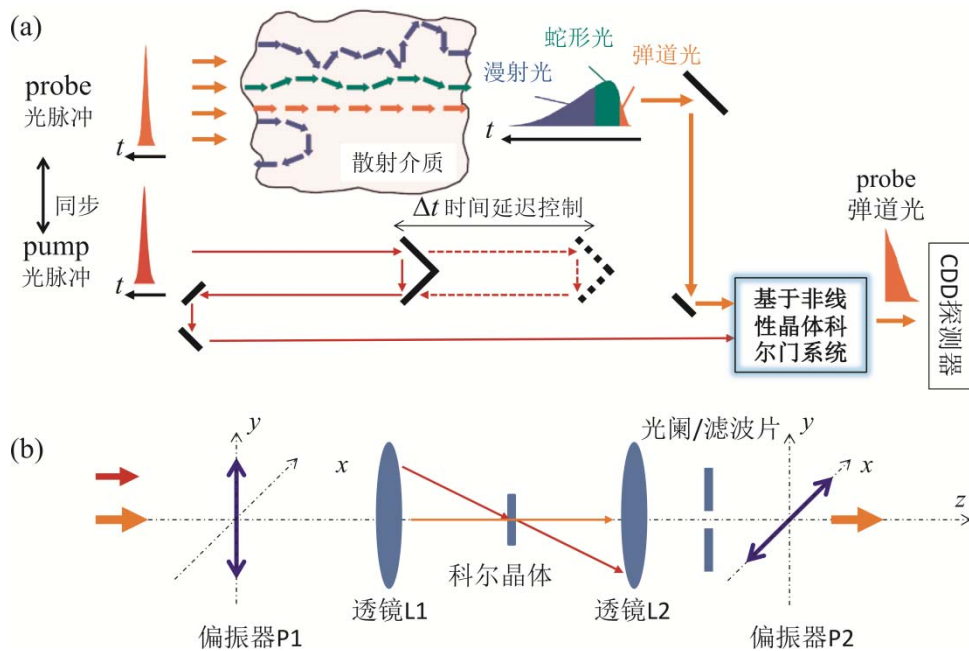


图1 (a)混浊介质中基于科尔门技术的超快光学成像原理示意图；(b)科尔门光学系统的构造
Fig.1 (a) Schematic description of Kerr-gate based ultrafast imaging technique in a turbid media;
(b) Schematic description of a Kerr gate

目前，虽然已经有不少非线性科尔晶体被应用，包括熔融石英，二硫化碳，碲化玻璃等等^[5-6]，但是普遍要求数 100 mJ/cm^2 能量密度的脉冲激光来激发晶体。这样高强度的激光脉冲，目前只能由高功率商业激光(比如钛宝石激光)通过激光放大器来实现。超快激光系统的高价格以及庞大的体积十分不利于超快科尔门技术

在实际应用的推广。因此，如何降低其激发能量密度是该超快技术进一步发展的关键问题。这一难题有望通过基于磁光科尔/法拉第效应的类似门控技术得以解决。

2 基于磁光效应的超快科尔/法拉第门光学成像

早在1846年 Michael Faraday 发现，当一束线性偏振光经过一个磁化介质透射后，其偏振方向会发生旋转；偏振角度与磁化矢量成依赖关系，该现象被称为磁光法拉第效应 (magneto-optic Faraday effect)。随后在1877年 John Kerr 在偏振光经过磁化界面反射后发现类似现象，该现象被称为磁光科尔效应 (magneto-optic Kerr effect)，如图2(a)所示。这两种磁光效应，其根本物理机制都是介质的磁化引起了相对介电常数张量异向性的改变，从而造成左旋偏振光 (σ^+) 和右旋偏振光 (σ^-) 的折射率不同^[8]。因此，不同圆偏振光的折射率、透射率以及吸收系数不再相同。换言之，通过控制介质的磁化强度，可以实现对反射光或者透射光偏振态的改变^[9]。

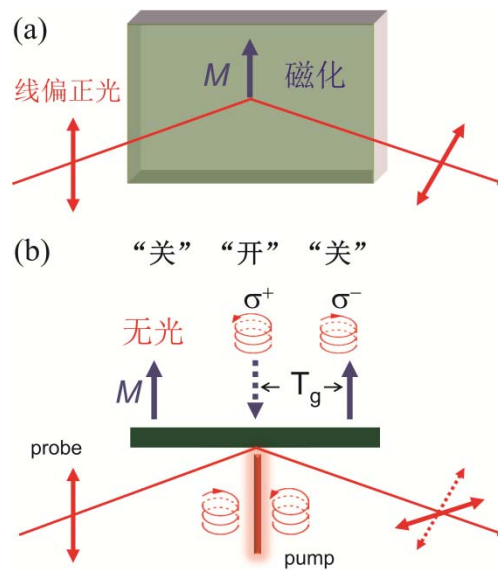


图2 (a) 磁光科尔效应示意图；(b) 基于磁光科尔效应的超快光学科尔门操控的基本原理

Fig.2 (a) Schematic description of magneto-optic Kerr effect; (b) Schematic description of an ultrafast controllable Kerr gate based on magneto-optic Kerr effect

1996年，E.Baurepaire 等人在 Ni 纳米薄膜铁磁材料中，首次观察到了飞秒激光脉冲所诱发的超快磁动力学过程^[10]。依据 B.Koopmans 的“3T”理论^[11]，即“自旋-晶格-电子”温度模型，激光脉冲激发金属材料时产生了大量高于费米温度的热电子，过剩的热能就会在这3个子系统之间弛豫。热电子的瞬间产生造成飞秒时间尺度的退磁现象；但是由于声子与周围环境的耦合相对较弱，因此晶格系统的弛豫时间相对较慢，这样就造成了铁磁系统退磁后往往需要数百皮秒时间尺度才能恢复平衡态的磁化。随后在2007年，C. D. Stanciu 等在 GdFeCo 亚铁磁材料中，基于逆向法拉第磁光效应，首次实现了利用光的螺旋度对该系统进行了磁化的超快反转^[12]，即不同偏振态的圆偏振光可以对磁化方向进行任意控制。光激发能量密度虽然降至在 1 mJ/cm^2 数量级，所产生的热能仍然造成了数 10 ps 时间尺度的弛豫过程。截至2014年，C-H. Lambert 等首次在 Co/Pt 纳米薄膜和 FePtAgC 纳米颗粒样品中观察了光的螺旋度对铁磁系统的磁化反转^[13]。其光脉冲能量密度已经降至 0.1 mJ/cm^2 数量级，这个数值往往已经可以在商用钛宝石激光系统实现；这样的低光功率激发，极有可能消除热效应对自旋系统的影响，而达到 1 ps 甚至更快的磁性反转^[14]。基于此，我们提出基于磁光效应的新型超快科尔（在发射介质条件下）/法拉第（在透射介质条件下）门技术，用于取代第1部分中所讲述的基于科尔电光效应的科尔门技术。

图2(b)描述了磁光科尔/法拉第门系统的基本工作原理，其中我们假设介质为 C-H. Lambert 工作中的磁性材料。与图1(b)类似，在无光激发的条件下，即平衡态磁化条件下，互相正交的偏振器将 probe 全部“关”住。为了让 probe 光通过偏振器 P2，我们设计利用第一束 pump 圆偏振光（不失一般性，采用左旋光）激发

磁性材料,使其磁性发生超快反转;为了精确选定图 1(a)的极短时间长度的弹道光部分,我们设计利用螺旋度相反的第二束 pump 光(右旋光)迅速将磁化方向再次超快反转,从而又将 probe 光“关”住。通过改变两束 pump 光之间的时间间隔 T_g ,可以任意控制磁光科尔门/法拉第门的时间长短。该门控技术的关键在于,在尽量避免热效应的条件下,选择合适的铁磁材料系统制作超快光控快门,则可实现面向实际应用的高散射介质成像。

致谢

我们衷心感谢“胡志宇专家工作站”以及云南北方驰宏光电有限公司对该工作的支持;十分感谢崔旭东和何为的丰富讨论和宝贵意见。

参考文献:

- [1] Dunsby C, P. M. W. French Techniques for depth-resolved imaging through turbid media including coherence-gated imaging[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2003, **36**: R207-R227.
- [2] Linne M. Imaging in the optically dense regions of a spray: A review of developing techniques[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2013, **39**: 403-440.
- [3] Das B B, R R. Alfano Ultrafast time-gated approach in optical biomedical imaging[J]. *Current Science*, 1999, **77**: 885-893.
- [4] Schaefer, Zane Donald. Ultrafast time-gated ballistic-photon imaging and shadowgraphy in optically dense rocket sprays[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**: B137-B144.
- [5] Purwar H, Saïd Idlahcen, Claude Rozé, et al. Collinear, two-color optical Kerr effect shutter for ultrafast time-resolved imaging[J]. *Opt. Exp.*, 2014, **22**: 15778-15790.
- [6] Tan W, Zhiguang Zhou, Aoxiang Lin, et al. High contrast ballistic imaging using femtosecond optical Kerr gate of tellurite glass[J]. *Opt. Exp.* 2013, **21**: 7740-7747.
- [7] Mathieu F, Reddemann Manuel, Palmer, Johannes et al. Time-gated ballistic imaging using a large aperture switching beam[J]. *Opt. Exp.*, 2014, **22**: 7058-7074.
- [8] Chen Y S. On-chip Spin Control in Semiconductor Micro-/Nano-structures[D]. Ph.D dissertation, University of Duisburg-Essen, 2012.
- [9] Sugano S, Kojima N. *Magneto-Optics*[M]. Springer, Heidelberg, 2000.
- [10] Beaurepaire E, Merle J-C, Daunois A, et al. Ultrafast spin dynamics in ferromagnetic nickel[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **76**: 4250-4253.
- [11] Koopmans B, Ruigrok J J M., Longa F Dalla, et al. Unifying ultrafast magnetization dynamics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **95**: 267207-1-4.
- [12] Stanciu C D, Hansteen F, Alexey Kimel, et al. All-optical magnetic recording with circularly polarized light[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, **99**: 047601-1-4.
- [13] Kirilyuk A, Kimel Alexey, V; Rasing Theo. Ultrafast optical manipulation of magnetic order[J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2010, **82**: 2732-2784.
- [14] Lambert C-H, Mangin S., B S D Ch S Varaprasad, et al. All-optical control of ferromagnetic thin films and nanostructures[J]. *Science*, 2014, **345**: 1337-1340.
- [15] S Alebrand, Alexander Hassdenteufel, Daniel Steil. Interplay of heating and helicity in all-optical magnetization switching[J]. *Phys. Rev. B*, 2012, **85**: 092401-1-5.