

# 飞秒互相关时间选通技术用于光学 层析成像的实验研究\*

张伟力 邢岐荣 陈野 孙涛 郑学梅 王清月  
(天津大学精仪学院超快激光研究室, 天津 300072)

**摘 要** 利用飞秒互相关二次谐波信号时间选通技术, 实现了对埋藏在高度散射介质中物体的透射成像和反射层析成像。互相关时间选通门有效地选出了携带物体信息的弹道光子和蛇行光子, 排除了给成像带来背景噪声的漫射光子, 分别获得了散射介质中物体的二次谐波一维和二维图像。

**关键词** 飞秒互相关, 时间选通, 光学层析成像, 散射。

## 1 引 言

光在生物组织中传输时, 强度的衰减主要来自散射。当物体埋藏在高散射介质中时, 光在介质中的多次散射而形成的背景噪声淹没了物体的轮廓信号, 因而难以直接对其成像。近几年出现的时间分辨(time-resolved)方法已被证明能够实现对高散射介质中物体的成像<sup>[1-9]</sup>。而飞秒激光脉冲的采用使该方法的时间分辨率达到  $10^{-14} \sim 10^{-15}$  s 数量级。目前主要的时间分辨方法包括: 条纹照相机<sup>[4-7, 9, 10]</sup>、光学克尔门、双光子吸收和互相关技术<sup>[2, 4]</sup>等。国外的一些研究小组分别采用上述方法研究对埋藏在高散射介质中物体的成像, 而此类实验研究在国内尚未见报道。本文报道运用飞秒二次谐波互相关时间选通(time-gating)技术对埋藏在高散射介质中的物体进行反射成像和透射层析成像(OCT)的实验研究工作。

时间分辨方法的出发点是根据不同光子在介质中传输时间上的差异, 只选出最先到达介质出射面的弹道光子和蛇行光子, 排除给成像带来噪声的漫射光子, 从而实现对埋藏在高散射介质中的物体的成像。本文采用飞秒二次谐波互相关时间选通成像方法, 其依据是: 从散射介质中出射的脉冲, 只有弹道光子和蛇行光子与参考光脉冲具有相关性<sup>[8]</sup>, 利用互相关技术可选出这部分对成像有用的光子。入射光脉冲的脉宽构成时间选通的门, 时间分辨率即为入射脉冲的时域宽度。本文以飞秒激光脉冲作为光源, 对物体成像的时间分辨率可达到飞秒量级。

\* 国家攀登计划及天津市自然科学基金(941407008)资助项目。

收稿日期: 1997 年 4 月 28 日; 收到修改稿日期: 1997 年 7 月 1 日

## 2 透射成像

### 2.1 实验装置

图1所示为飞秒二次谐波互相关时间选通透射成像的实验装置。光源采用本实验室研制的 ULL7850 型自锁模 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光器。与碰撞脉冲锁模飞秒染料激光系统相比,该激光器具有更宽的调谐范围和更高的稳定性,并且结构简单,使用更加方便。激光输出的平均功率为 400 mW,中心波长在 750~830 nm 之间可调谐。频谱范围处于生物组织的透射窗口 500~1300 nm 之间,生物组织对光的吸收最小<sup>[11]</sup>。激光中心波长为 780 nm,重复频率为 84 MHz,脉宽为 20~50 fs。M<sub>1</sub>~M<sub>4</sub> 均为平面全反镜,L<sub>1</sub>和L<sub>2</sub>为焦距  $f = 10\text{ cm}$  的透镜,L<sub>3</sub>为焦距  $f = 5\text{ cm}$  的透镜,BS 为分束器。从分束器反射的光脉冲作为参考光,经过光学延迟线,再经过透镜 L<sub>3</sub> 聚焦在倍频晶体 BBO 上与从散射介质中出射的光脉冲重合,产生倍频信号。从 BS 透射的光脉冲经 L<sub>1</sub> 聚焦在盛有散射介质的染料盒中,染料盒通光方向长度为 24 mm。散射介质分别采用不同浓度的牛奶溶液、苹果切片和猪肉组织切片。待测的样品条形物,其遮光及透光间隔均为 2 mm。实验中将样品置于光束的焦点位置以提高空间分辨率。经过 L<sub>1</sub> 聚焦后,焦斑尺寸小于 20  $\mu\text{m}$ 。染料盒置于由步进马达带动的平台上,平台移动方向垂直于光脉冲的入射方向。从盒中出射的脉冲由透射系统 L<sub>2</sub> 和 L<sub>3</sub> 收集、聚焦后入射到 BBO 晶体上并与参考光脉冲相关。仔细调节参考光路延迟,使参考光脉冲与从散射介质中出射光脉冲的前沿——弹道光子和蛇行光子在 BBO 晶体中相关而产生倍频信号。样品的图像信息通过倍频信号的变化被记录下来。当马达带动平台上的样品扫描时,由记录仪记录倍频信号的变化,从而得到样品的一维图像。

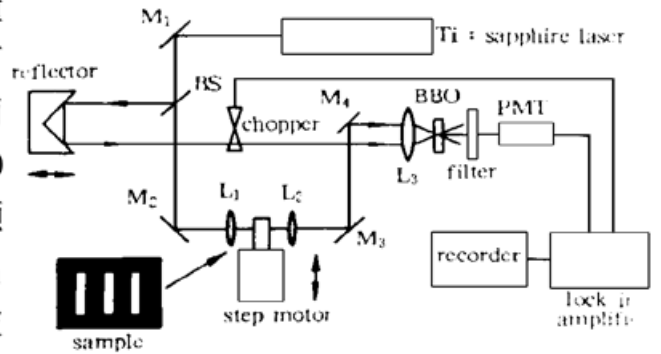


Fig. 1 The schematic of transmissive image setup

从分束器反射的光脉冲作为参考光,经过光学延迟线,再经过透镜 L<sub>3</sub> 聚焦在倍频晶体 BBO 上与从散射介质中出射的光脉冲重合,产生倍频信号。从 BS 透射的光脉冲经 L<sub>1</sub> 聚焦在盛有散射介质的染料盒中,染料盒通光方向长度为 24 mm。散射介质分别采用不同浓度的牛奶溶液、苹果切片和猪肉组织切片。待测的样品条形物,其遮光及透光间隔均为 2 mm。实验中将样品置于光束的焦点位置以提高空间分辨率。经过 L<sub>1</sub> 聚焦后,焦斑尺寸小于 20  $\mu\text{m}$ 。染料盒置于由步进马达带动的平台上,平台移动方向垂直于光脉冲的入射方向。从盒中出射的脉冲由透射系统 L<sub>2</sub> 和 L<sub>3</sub> 收集、聚焦后入射到 BBO 晶体上并与参考光脉冲相关。仔细调节参考光路延迟,使参考光脉冲与从散射介质中出射光脉冲的前沿——弹道光子和蛇行光子在 BBO 晶体中相关而产生倍频信号。样品的图像信息通过倍频信号的变化被记录下来。当马达带动平台上的样品扫描时,由记录仪记录倍频信号的变化,从而得到样品的一维图像。

### 2.2 实验结果与讨论

图 2 是以不同浓度的牛奶溶液作为散射介质得到的实验结果,图 2(a)、(b)、(c) 分别对应体积浓度为 1.5%、3% 和 4.5%。实验曲线的横坐标表示样品的位置,纵坐标为倍频信号强度。曲线的波峰代表样品的透光部位,波谷代表样品的遮光部位。由实验曲线可以看出,随着牛奶溶液浓度的增大,样品的轮廓图像越来越模糊。这是由于随着浓度增加,散射加强,则传输平均自由程  $l_t$  减小,弹道光子部分由于指数衰减而变得极弱,而蛇行光子则成为探测

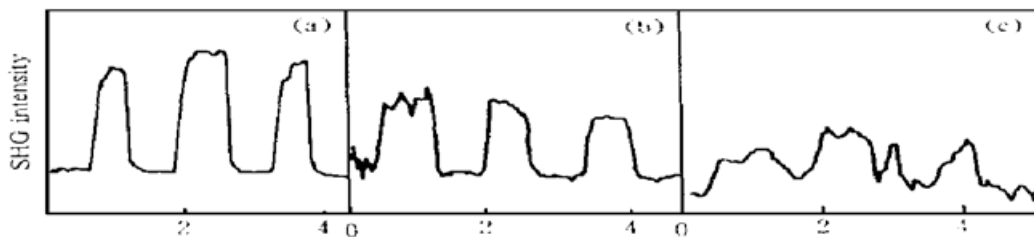


Fig. 2 SHG intensity when the bar code made a horizontal scan. The one-dimensional images are obtained through 24-mm-thick whole milk solution where the volume concentration is (a) 1.5%, (b) 3%, (c) 4.5%

的主要部分。由于蛇行光子与参考光脉冲的相干性与弹道光子比较差，造成轮廓图像不同程度的模糊。

图 3、图 4 是以 2 mm 厚的苹果切片和 1 mm 厚的猪肉组织切片作为散射介质透射成像的实验结果。实验中，苹果切片与猪肉组织切片均置于清水中以避免被激光烧焦，影响组织的特性。样品放在切片的后方。实验曲线中各个波峰的高低起伏很大，主要由于生物组织内部不均匀及切片厚度不均匀造成的。图 4 的图像轮廓较图 3 更模糊，说明了猪肉组织的散射比苹果更强。

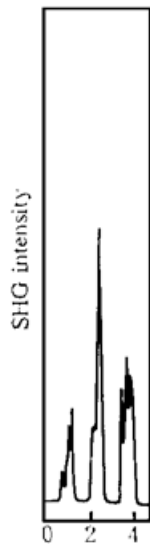


Fig. 3 SHG intensity when the bar code behind 2-mm-thick apple slide made a complete horizontal scan

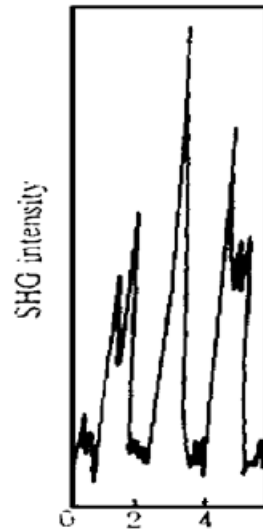


Fig. 4 SHG intensity when the bar code behind 1-mm-thick porcine tissue slide made a complete horizontal scan

### 3 反射层析成像

上述实验结果表明，透射成像在一定程度上可以准确给出埋藏于散射介质中样品的轮廓图像，但无法探测样品在散射介质中的深度。本文在透射成像实验的基础上，对埋藏于散射介质中的样品采用反射式成像。通过记录参考光束零延时的变化，在对样品轮廓成像的同时也可探测样品在散射介质中的深度，真正实现了对样品的光学层析成像。

#### 3.1 实验装置

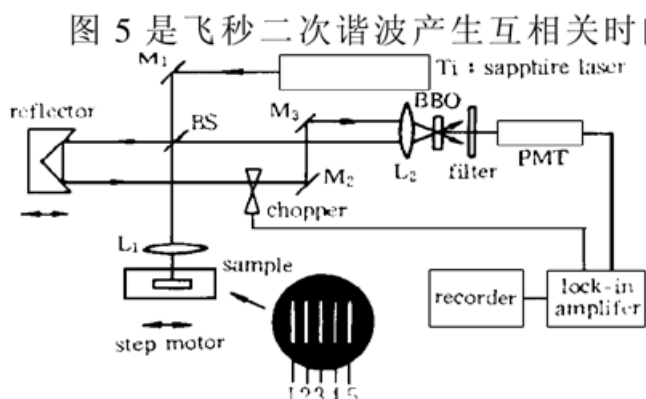


Fig. 5 The schematic of experimental setup for optical coherent tomography

图 5 是飞秒二次谐波产生互相关时间选通反射层析成像的实验装置。光源仍采用 ULL7850 型自锁模  $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$  飞秒激光器。M<sub>1</sub>~M<sub>3</sub> 为平面全反镜，L<sub>1</sub> 为焦距  $f = 10 \text{ cm}$  的透镜，L<sub>2</sub> 为焦距  $f = 5 \text{ cm}$  的透镜，BS 为分束器。从分束器反射的光脉冲作为参考光，经过光学延迟线，再经过透镜 L<sub>2</sub> 聚焦在倍频晶体 BBO 上与从散射介质中出射的光脉冲重合，产生倍频信号。从分束器透射的光脉冲在入射到装有散射介质的染料盒之前经过 L<sub>1</sub> 聚焦在样品上，焦斑尺寸小于  $20 \mu\text{m}$ 。染料盒在通光方向上的长度为 24

mm。散射介质选用体积浓度为 2.4% 的牛奶溶液和苹果切片。将与透射成像类似的条状物 (遮透光间隔均为 1 mm) 固定在一平面反射镜上作为反射样品, 并固定在一个二维调整架上, 置于染料盒之后。染料盒与样品仍放在由马达驱动的可移动平台上, 其移动方向垂直于光脉冲入射方向。

当平台移动时, 激光脉冲逐点扫描样品。通过调节调整架使全反镜与入射光脉冲垂直方向成  $1\sim 2^\circ$  夹角。当步进马达移动平台时, 相当于对样品的不同深度进行了扫描, 以实现样品的层析成像。样品的不同深度对应于参考光路不同的延时。改变参考光脉冲的延时, 使散射介质中不同深度处反射脉冲的弹道光子与蛇行光子部分通过透镜  $L_2$  的焦点正好在 BBO 晶体上重合、相关产生倍频信号。样品不同深度处的图像信息通过倍频信号的变化体现出来。当介质的散射足够强时, 弹道光子和蛇行光子的强度非常小, 因此倍频信号很弱。实验中采用光电倍增管 (PMT) - 锁相放大器 (Lock-in-Amplifier) 探测系统以提高对弱信号的检测能力, 锁相放大器的信号输出直接进入 X-Y 函数记录仪。当马达带动平台上的样品扫描时, 记录仪通过记录倍频信号的变化来获得样品的图像。

### 3.2 实验结果与讨论

图 6 是以体积浓度为 2.3% 的牛奶溶液作为散射介质, 反射层析成像的实验结果。图 6 (a)、(b)、(c) 分别表示对样品 (见图 5) 的三个通光位置 2、3、4 (即样品的三个深度) 的成像结果。通过调节参考光路的延时, 即可改变层析深度。以位置 2 为例, 当样品的位置 2 处于光路的零延时位置时, 参考光脉冲正好与反射脉冲的弹道光子和蛇行光子部分重合, 在这个位置处的倍频信号最强。马达带动平台移动时, 参考光脉冲与从位置 1、3 反射的光脉冲的弹道光子部分和蛇行光子部分只有部分重合, 因此倍频信号较弱。当脉冲入射到样品其他位置时, 参考光脉冲与反射脉冲的前沿部分不再有重合的部分, 则没有倍频信号。以此类推可以分析参考光路延时对应样品位置 3、4 的结果。图 6(a)、(b)、(c) 中三个最高峰的高度不相同, 是由于激光器的输出功率不同造成的。图 7 是以 1 mm 厚的苹果切片为散射介质分别对样品的三个通光位置层析成像得到的实验结果。由于生物组织的不均匀性、切片的厚度不匀和较强的散射等因素, 实验曲线与上述牛奶溶液相比有较大的起伏。

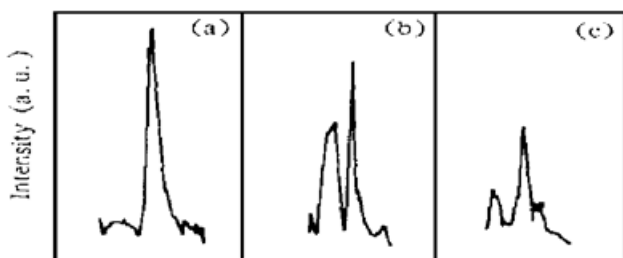


Fig. 6 SHG intensity when the sample made a horizontal scan. The images (a), (b), (c) are obtained through 12 mm-thick 2.4% whole milk solution when the positions of the optical delay line correspond to the position 2, 3, 4 of the sample respectively

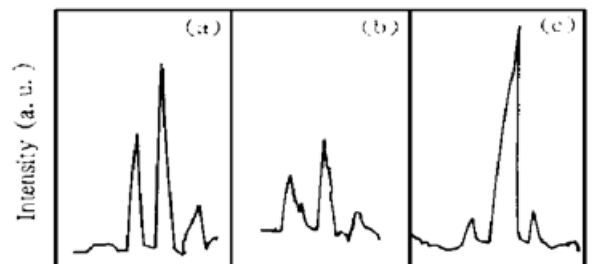


Fig. 7 SHG intensity when the sample made a horizontal scan. The images (a), (b), (c) are obtained through 1 mm-thick apple-slice when the positions of the optical delay line correspond to the position 2, 3, 4 of the sample respectively

## 4 二维图像



Fig. 8 A two-dimensional picture of a “田” shape object hidden in 3% milk-solution

前述实验结果均为带有散射介质中物体图像信息的二次谐波系列曲线即一维图像，只反映物体的局部特征。而二维图像可描绘物体的轮廓，是医学诊断中的常用方法。在图 1 所示的透射成像系统中，将盛有散射介质的染料盒置于由步进马达带动的二维平台上，可实现飞秒光脉冲对物体的二维成像。散射介质采用浓度为 3% 的牛奶溶液，将一“田”形金属片置于其中。以 A/D 转换器和计算机数据采集-处理-实时显示系统取代 X-Y 函数记录仪，可实时显示埋藏于散射介质中物体的二维图像。图 8 所示即为经过噪声处理的金属片二维照片。而基于反射层析成像实验原理，可望获得散射介质中物体的三维图像，但有较大难度，它是本文后续研究工作所追求的目标。

**小 结** 以自锁模 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光器为光源，采用飞秒二次谐波互相关时间选通技术对埋藏于不同散射介质之中的样品进行了透射成像和反射层析成像的原理性实验研究，分别获得了带有散射介质中物体图像信息的二次谐波一维和二维图像。若采用更完善的数字图像探测-处理系统，将显著提高实验对高散射介质中物体的成像能力。此外，改善聚集系统，压缩飞秒光脉冲宽度，将进一步提高实验的空间分辨率和时间分辨率。

## 参 考 文 献

- [1] J. C. Diels, Ching-yue Wang, J. J. Fontaine, Accurate range gating technique with mode-locked dye laser. *Proc. SPIE*, 1982, **322**: 166~ 169
- [2] S. Andersson-Engels, R. Berg, S. Svanberg *et al.*, Time-resolved transillumination for medical diagnostics. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(21): 1179~ 1181
- [3] K. M. Yoo, Qirong Xing, R. R. Alfano, Imaging objects hidden in highly scattering media using femtosecond second-harmonic-generation cross-correlation time gating. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(13): 1019~ 1021
- [4] B. B. Das, K. M. Yoo, R. R. Alfano, Ultrafast time-gated imaging in thick tissues: a step toward optical mammography. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(13): 1002~ 1004
- [5] Feng Liu, K. M. Yoo, R. R. Alfano, Ultrafast laser-pulse transmission and imaging through biological tissues. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(4): 554~ 557
- [6] K. M. Yoo, B. B. Das, R. R. Alfano, Imaging of a translucent object hidden in a highly scattering medium from the early portion of the diffuse component of a transmitted ultrafast laser pulse. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(1): 958~ 960
- [7] J. C. Hebden, R. A. Kruger, K. S. Wong, Time-resolved imaging through a highly scattering medium. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(7): 788~ 794
- [8] M. R. Hee, J. A. Izatt, J. M. Jacobson *et al.*, Femtosecond transillumination optical coherence tomography. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(12): 950~ 952
- [9] J. C. Hebden, Time-resolved imaging of opaque and transparent spheres embedded in a highly scattering medium. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(21): 3837~ 3841
- [10] P. P. Ho, P. Baldeck, K. S. Wong *et al.*, Time dynamics of photon migration in semiopaque random media. *Appl. Opt.*, 1989, **26**(12): 2304~ 2310
- [11] B. C. Wilson, S. L. Jacques, Optical reflectance and transmittance of tissues: principles and applications. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, **QE-26**(12): 2186~ 2199

# Imaging Towards Optical Coherent Tomography Using Femtosecond Second-Harmonic-Generation Cross-Correlation Time Gating

Zhang Weili Xing Qirong Chen Ye Sun Tao

Zheng Xuemei Wang Qingyue

(*Ultrafast Laser Laboratory, College of Precision Instruments & Optoelectronics Engineering  
Tianjin University, Tianjin 300072*)

(Received 28 April 1997; revised 14 July 1997)

**Abstract** A femtosecond time-gating of cross-correlation second-harmonic-generation is shown to be a versatile technique to image objects through various highly scattering medium, and optical coherent tomography (OCT) is achieved preliminarily. The ballistic and snake pulse component, that contain the information of the objects are effectively selected, while the diffuse component which contributes bright background noise to the image is eliminated by time-gating of femtosecond cross-correlation second-harmonic-generation. The SHG one-dimensional and two-dimensional pictures of objects hidden in highly scattering medium are recorded, respectively.

**Key words** femtosecond cross-correlation, time-gating, optical coherent tomography, scattering.

## 征文通知

全国第七届高校光学、第八届激光物理学术与教学会议,定于1998年8月中旬在内蒙古呼和浩特市召开,现将有关事项通知如下:

1、这次会议受中国光学学会基础光学专业委员会委托,由内蒙古工业大学主办。

2、会议征文范围:

(1) 基础光学理论及其应用; (2) 国内外光学理论研究及应用的发展动向; (3) 量子光学和光子学; (4) 信息光学及光通讯与光计算; (5) 非线性光学与新型材料; (6) 固体发光与发光物理; (7) 激光光谱与红外光谱; (8) 激光技术与激光器件; (9) 生物光学、组织光学与激光生命科学; (10) 国内外光学教学动态; (11) 光学教材、教学法和实验改革探讨、光学系统多媒体教学及设备; (12) 其它光学领域的研究及成果。

3、征稿要求

(1) 论文需未在国内外公开刊物上发表; (2) 论文稿要求格式: 中文题目、作者姓名、单位、邮编、摘要、关键词及全文。英文题目、作者姓名、单位及英文摘要、关键词。要用B5纸打印一式两份,于1998年3月31日前寄“内蒙古工业大学物理教研室(邮编010062): 焦玉银”。联系电话: (0471) 6514466-2445

4、录用论文拟以《内蒙古工业大学学报》增刊形式发表。

内蒙古工业大学

1997年7月8日