

75-79

第4卷第5期
1996年10月光学 精密工程
OPTICS AND PRECISION ENGINEERINGVol. 4, No. 5
October, 1996

飞秒全息成像技术研究

TB877.1

成 铎 王 国 志

(中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室, 西安710068)

⑫ **A** 摘要 飞秒全息成像技术目前主要有两个应用方向: 飞行中的光波记录方法以及透过高散射介质(特别是生物活组织)成像。本文针对第二个应用方向做了一些初步工作, 建立起了一套完整的电子全息系统, 包括数字再现软件、CCD 摄像机、图像采集处理机。采用建立的电子学全息系统, 在空气中拍摄了金属丝的飞秒全息图, 为进一步利用飞秒全息技术研究透过高散射介质成像打下了基础。

关键词: 飞秒全息成像; 透过高散射介质成像; 电子学全息

1 引 言

飞秒全息成像技术作为研究超快现象的基本手段之一具有重要的科学研究和应用价值, 目前越来越受到人们的重视。但该技术据我们目前掌握的资料国内尚无报道, 国外只有瑞典、美国、英国等少数国家正在研究此项技术。瑞典的 N. Abramson 研究小组主要利用皮秒、飞秒脉冲全息技术研究飞行中的光波记录^[1](light-in-flight recording)及这种飞光记录方法在物体面形测量、三维物体识别等其它方面的应用。美国的 E. Leith 研究小组主要从事飞秒全息技术在医学成像方面(如癌肿块等软组织病变的早期诊断)的应用研究。该方法在其它透过高散射介质成像的应用领域也极有发展潜力。目前这一方法的空间分辨率在亚毫米数量级。

本文正是针对透过高散射介质成像这一应用方向, 作了一些初步研究工作, 重点放在电子学全息系统的建立上, 这是本项目研究的关键部分。在此基础上, 拍摄了金属丝的飞秒全息图。

2 利用飞秒激光脉冲透过高散射介质成像的原理

美国 E. Leith 研究小组最先将飞秒全息技术成功地应用于透过高散射介质成像, 其原理主要是利用了全息选通技术, 使参考光最先到达光干涉, 形成全息图。

由于光透过高散射介质时存在严重的散射, 所以必须采用脉冲光源成像。超短激光脉冲经过高散射介质很容易展宽上百倍。展宽后的出射脉冲可分为两部分: 最先到达光(first-arriving light)和后续到达光(later-arriving light)。最先到达光经过的路程最短, 散射最小, 利用它可以形成良好的散射介质内部结构的阴影图像。后续到达光经过严重的散射, 对成像没有益处。一

收稿日期: 1996年6月5日

般实际应用需具有毫米级的分辨率,它所要求的最先到达光宽度为亚皮秒级^[2]。

现在的问题是如何将最先到达光分离出来。最先到达光与后续到达光到达探测器的时间不同,所以需采用时间选通方法。常用的时间选通方法有 Kerr 快门和条纹相机,这两种方法都有缺点。Kerr 快门需要笨重的大功率激光系统,同步扫描型条纹相机的时间分辨率只有5—10 ps。

飞秒全息选通技术具有功率低、二维成像(条纹相机需要扫描过程以建立二维图像)、时间分辨率与脉宽相同、整个系统易于调整等优点,成为分离最先到达光的有效、实用方法。该方法以参考光作为选通快门,调整参考光的光程(延迟),使其与最先到达光同时到达接受面,两者形成全息图。后续到达光没有与参考光在空间上相遇,不能形干涉条纹,只能作为背景噪声存在。这样,包含有图像信息的最先到达光被成功地分离出来。

接收器件采用 CCD 摄像机。这是因为最先到达光只占整个展宽出射脉冲的很小一部分(对于几毫米厚的生物组织只占百分之几),能量很弱,传统的照相底片量子效率太低,无法满足要求,CCD 芯片具有高得多的量子效率(可达40%)^[2]。

CCD 将全息图存储下来,传送到计算机,全息图在计算机内经过 Fourier 变换、滤波(以分离出一级衍射项)、逆 Fourier 变换,最终解调出原始图像。这就是电子学全息方法。经过这些处理,后续到达光所产生的强背景就可以有效地去除。

为了进一步提高信噪比,需要将多幅全息图叠加起来,这样做的前提条件是各幅全息图散斑之间互不相关。对于我们感兴趣的典型散射介质(如生物组织、混浊溶液等),散斑的相关时间在30 ms 数量级^[2]。因此,可以让每一幅全息图的曝光时间足够短,使得在这一时间内散斑稳定不动。而记录各幅全息图之间的时间间隔大于散斑的相关时间,这样各幅全息图的散斑噪声是互不相关的。当叠加多幅全息图时,信号增强,散斑噪声随机叠加互相抵消,信噪比大大提高。

综合起来,这一套方法可以称之为超快选通电子学全息成像技术。

由此看出,超快选通电子学全息技术是透过高散射介质二维成像的有效方法。

3 电子学全息方法

电子学全息方法以全数字方式记录和再现全息图,其原理可以借助对全息图频谱的数学分析说明。图1表示记录离轴全息图的光路安排,其中画出了坐标系,记录介质表面在 xy 平面内,物光与参光的夹角为 θ 。为了实现数字再现,我们在空间频域分析按图1方法记录的全息图^[3]。假设全息图面上的物光复振幅为 $a[x, y]$, 平面参考光的复振幅显然为 $R = r \exp [i2\pi\xi, x]$, 其中 $\xi = -\sin\theta/\lambda$, λ 为单色光源的波长, r 代表参光振幅的常数。全息图面上的强度分布为:

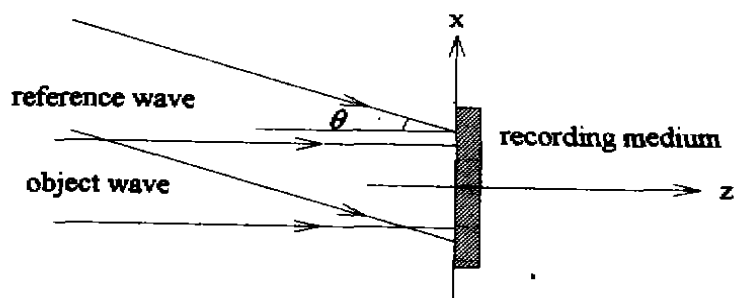


图1 记录离轴全息图的简单光路

Fig. 1 The simple arrangement for forming off-axis hologram

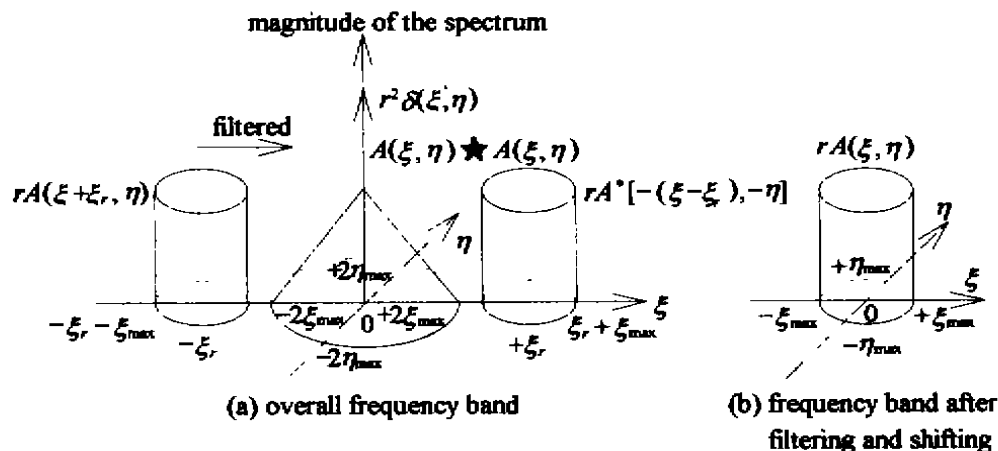


图2 全息图面上干涉光强的频谱

Fig. 2 The spectrum of the intensity at hologram plane

$$I[x, y] = aa^* + RR^* + aR^* + a^*R \tag{1}$$

$$= au^* + r^2 + arexp[-i2\pi\xi, x] + a^* r exp[i2\pi\xi, x]$$

现在我们在空间频域分析式(1),假设 $a[x, y]$ 的频谱 $A[\xi, \eta]$ 是带宽有限的,在空间频域的宽度从 $-\xi_{max}$ 到 $+\xi_{max}$ 和 $-\eta_{max}$ 到 $+\eta_{max}$ 。式(1)右边第一项的频谱是 $A[\xi, \eta]$ 的自相关函数,它的宽度从 $-2\xi_{max}$ 到 $+2\xi_{max}$ 和 $-2\eta_{max}$ 到 $+2\eta_{max}$;第二项的频谱是一个位于 $[0, 0]$ 点的 δ 函数;第三项的频谱为 $rA[\xi + \xi_r, \eta]$;最后一项的频谱为 $rA^*[-(\xi - \xi_r), -\eta]$ 。全息图面上干涉强度的频谱如图2(a)所示。

可以看到当 $\xi_r \geq 3\xi_{max}$ 时,式(1)右边前两项与第三项和第四项的频谱是相互分离的,它类似于再现离轴全息图时0级与±1级衍射项在一定条件下是相互分离的。

显然,我们可按下列三步从 $I[x, y]$ 中分离出 $a[x, y]$ 。

a)对接收到的全息图傅立叶变换

$$F[I(x, y)] = \iint_{-\infty}^{+\infty} I(x, y) \exp[-i2\pi(\xi x + \eta y)] dx dy \tag{2}$$

即

$$I[\xi, \eta] = A[\xi, \eta] \star A(\xi, \eta) + r^2 \delta(\xi, \eta) + rA(\xi + \xi_r, \eta) + rA^*[-(\xi - \xi_r), -\eta] \tag{3}$$

其中, $I(\xi, \eta)$ 是 $I(x, y)$ 的频谱。

b)滤波

取出(3)式右边第三项,将其沿 ξ 轴正方向平移 ξ_r ,得到 $rA[\xi, \eta]$ 。

c)逆傅里叶变换

$$F^{-1}[rA(\xi, \eta)] = \iint_{-\infty}^{+\infty} rA(\xi, \eta) \exp[i2\pi(\xi x + \eta y)] d\xi d\eta = ra(x, y) \tag{4}$$

至此,除了一个常数 r 外全息图面上的复振幅分布成功地得以再现。

本文以上述原理为基础,编制了数字再现软件,结合 CCD 摄像机、图像采集处理机,建立起了一套完整的电子学全息系统。

4 飞秒电子学全息成像

我们利用前面建立起来的电学全息系统,针对飞秒脉冲透过高散射介质成像这一应用方向,做了一些初步工作,即在没有散射介质的情况下拍摄到了飞秒全息图。

所采用的光路系统如图3所示,其中关键是高精度的光程调整机构。由于成像脉冲宽度是100 fs左右,它所对应的空间长度为0.03 mm,所以光程调整机构的精度应在0.01 mm以上。

成像透镜将全息图成像到白屏上,然后由 CCD 射像机记录下屏上的全息图,物体是一根细金属丝,物、参光束夹角为 0.37° 。飞秒光脉冲由锁模 Ti 宝石激光器提供,其重复频率为82 MHz,波长 $0.8 \mu\text{m}$,输出功率 $\sim 400 \text{ mW}$,脉冲宽度为112 fs。拍摄到的飞秒全息图及解调结果如图4所示。

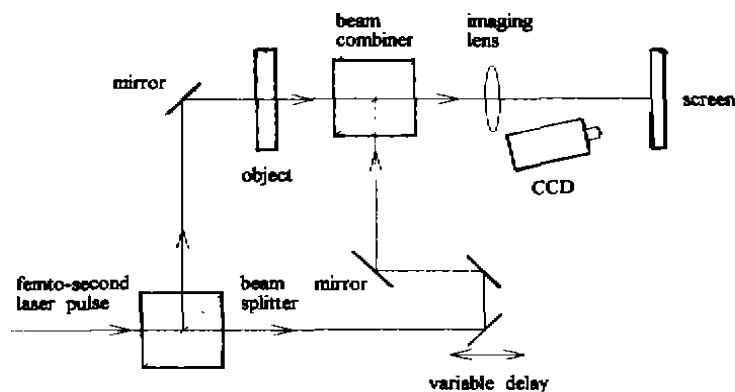


图3 记录飞秒全息图的光路布置

Fig. 3 The optical path arrangement of the recording of femtosecond hologram

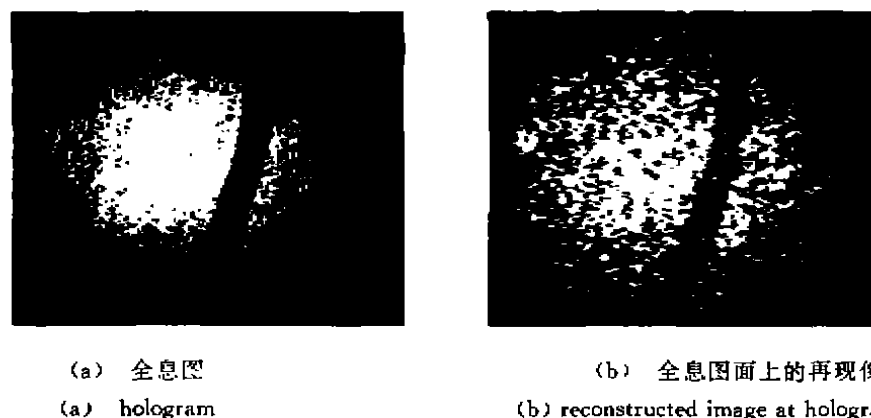


图4 拍摄到的飞秒全息图及解调结果

Fig. 4 The recorded hologram and reconstructed result

5 存在的一些问题及结论

飞秒全息成像技术作为九十年代发展起来的新兴技术,已经取得了一些初步成果,如记录下了光波的传播过程、透过一定厚度(几毫米)的散射介质(特别是生物活组织)拍摄到了其内部吸收结构的图像,并且已获得了亚毫米数量级的分辨率等。

但是,它仍然存在许多问题。如目前的技术尚无法产生满足实际应用要求的单次飞秒光脉

冲,这使我们还不能获得真正意义上的飞秒时间分辨率。

CCD 芯片的像素数目及分辨也是一个重要问题,它直接影响飞秒电子学全息成像系统的空间分辨率。虽然已有几千 \times 几千像系的面阵 CCD,并且还在不断发展,但随着像素数目的增加,图像采集时间及相应的二维傅氏变换时间将大大增加,给该技术的实用化带来困难。目前的情况即使采用硬件完成二维傅氏变换也只达到 500×500 像素左右的应用水平。

另外,目前飞秒激光器的效率仍然很低,这造成高能耗、低输出,整个系统成本过高,使这一技术的应用受到限制。

尽管存在一些问题,但它在医学诊断等领域的应用价值以及光源、信号处理等技术的不断发展,使飞秒全息成像技术具有强大的生命力。

本文所取得的只是一个没有经过散射介质的初步实验结果。但是它说明:1)采用飞秒选通电子学全息技术透过高散射介质成像是完全可行的,它是医学诊断等领域具有发展前途的新兴技术;2)本文所建立起来的飞秒全息成像系统是成功的,并且为以后的工作打下了基础。

致谢:本题目得到了西安光机所郝志琦、王淑岩、丰善等同志的热情帮助,在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] N. Abramson, Light-in-flight recording; high-speed holographic motion pictures of ultrafast phenomena. *Appl. Opt.*, 1983, 22: 215—232
- [2] H. Chen et al., Two-dimensional imaging through diffusing media using 150-fs gated electronic holography techniques. *Opt. Lett.*, 1991, 16: 487—489
- [3] R. J. Collier et al., *Optical Holography*. New York: Academic Press, 1971, Chap. 8.

Investigation of Femtosecond Laser Holographic Imaging Technology

Cheng Duo, Wang Guozhi

(State Key Lab. of Transient Optics and Technology,
Academia Sinica, Xi'an 710068)

Abstract

Femtosecond pulse laser holography now has two main applications; light-in-flight recording method and imaging through highly scattering medium (especially through living tissue). Being aimed at the second application, this paper has got initial results. The whole system of electronic holography has been built up. It includes digital reconstruction software, CCD camera and image processor. Femtosecond hologram of a thin wire in air has been recorded using the established system. It lays a foundation for further investigation of imaging through highly scattering medium.

Key words: Holographic imaging with femtosecond laser pulse, Imaging through highly scattering medium, Electronic holography

成 铎 男, 1967年11月生于陕西省, 1988年毕业于华东工学院光电成像技术专业, 获理学学士学位。1996年于中科院西安光机所获理学硕士学位。现工作于西安光机所, 研究领域主要在全息干涉计量, 数字图像处理及光学薄膜设计。