

样头等。

(3) 有线电视和移动通信. 有线电视可用同轴电缆和光纤传输, 后者的容量和无中继传输距离比前者大得多, 因而成本较低. 为了用光波传输微波信号, 采用 LD 直接调制技术或副载

波调制技术以及图像信号副载波波分复用技术. 移动通信遇到建筑物遮挡或在隧道内、地下街道中会产生极大衰减. 此时就可以在这些遮挡处用光纤通信代替微波, 也就是形成微波与光纤混合的传输通道.

采用最早到达光透过高散射介质成像*

侯比学 陈国夫

(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)

摘要 综述了最早到达光方法透过散射介质成像技术, 详细地介绍了克尔快门时间空间选通成像技术、共焦扫描条纹相机成像技术、非线性二次谐波产生 - 互相关选通成像技术及电子学全息选通成像技术, 对这几种选通成像技术目前的发展状况、优缺点给出了评述.

关键词 最早到达光, 散射介质, 选通, 成像

IMAGING THROUGH HIGHLY SCATTERING MEDIA USING FIRST-ARRIVING-LIGHT

Hou Bixue Chen Guofu

(State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068)

Abstract The technique of imaging through highly scattering media using first - arriving - light is summarized. Four kinds of time - resolved imaging techniques are described in detail, including the Keer - gate, confocal scanning streak camera, second - harmonic - generation cross - correlation, and electronic holography. Their current development and their advantages and disadvantages, are discussed.

Key words first - arriving - light, scattering media, gating, imaging

1 引言

透过高散射介质(特别是生物组织)成像一直是人们最感兴趣、最具有挑战性的研究方向之一. 其原因之一是这个课题的发展在医学诊断等领域有着潜在的应用前景, 因而在国际上是非常热门的一个课题, 但是它在国内才刚刚起步. 在各种透过高散射介质成像技术中, 最早到达光方法是最有发展前途的方法之一, 这种方法是基于最早到达光概念. 一个窄的光脉冲

通过高散射介质后, 由于严重的散射, 从介质的另一面出射的光是依次射出的, 散射不严重的光较早地出现于介质的另一侧, 而严重散射的光较迟地出现, 这样通过散射介质以后的光脉冲将被展宽. 展宽后的脉冲可分为三部分^[1,2]: 弹道光(ballistic light)、蛇行光(snake light)和散射光(diffusive light). 弹道光沿入射光方向直线透过散射介质, 蛇行光在介质内散射次数不多, 在前进方向上很小的一个锥角内传播, 这

* 1998 - 07 - 17 收到初稿, 1998 - 11 - 02 修回

两种光构成最早到达光,较早地出现在出射脉冲的前沿,可以形成较好的像。散射光(即后续到达光)在介质内严重散射,走过曲折的路径,较迟地出现在出射脉冲的后续部分,这部分光将影响成像质量,严重时完全淹没成像目标的像。

对于成像而言,只有处在出射脉冲前沿的最早到达光才带有有用信息,而影响成像质量的后续到达光处在出射脉冲的后续部分,这两部分光在时间上是分开的,这样,就可以采用时间选通方法把最早到达光从出射脉冲中分离出来成像,从而摆脱了后续到达光的影响。常用的选通成像方法有:克尔快门时间空间选通成像技术、共焦扫描条纹相机成像技术、非线性二次谐波产生-互相关选通技术及电子学全息选通成像技术。下面分别介绍这几种方法。

2 克尔快门时间空间选通成像技术

克尔快门时间空间选通成像技术是把空间频谱滤波和超快时间选通结合起来的一种成像技术。一个超短激光脉冲进入散射介质后,最早到达光部分几乎沿着入射光方向直线透过散射介质,其波前可近似看作是平面波前或准平面波前,空间频率成分主要是零频光和低频光;较迟出现的后续到达光经过多次散射,可近似看作是从散射介质每一点出射的光,它具有球面波前,其空间频率成分主要是高频光。因此,这两部分光在空间频谱平面上表现出不同的分布。最早到达光出现在光轴中心区域;后续到达光出现在整个谱平面上,形成一个近似均匀的亮背景。这样,不仅在时间上而且在空间上也可以选通最早到达光成像,将会得到信噪比较高的图像。

基于上述原理,L. Wang 等人^[3,4]采用克尔快门技术,实现了时空选通透过散射介质成像。光路安排如图 1 所示^[3]。成像系统是一个由透镜 L_1 和 L_2 组成的 $4F$ 光学系统,散射介质和成像目标放置在 L_1 的前焦面上。克尔快门是由盛有 CS_2 的克尔盒和一对正交的起偏器和检偏器

构成,克尔盒放置在 L_1 的后焦面即空间频谱平面上。实验中采用钽玻璃锁模激光器作为光源,脉冲宽度是 8ps,波长为 1054nm。用基波光作为成像系统的照明光,通过调节延迟线可以改变成像光脉冲透过克尔快门的时间,与克尔快门的匹配使用可实现时间上的选通。通过倍频晶体 KDP 的二次谐波 527nm 的光作为打开克尔快门的诱导光,它会在克尔盒上诱导产生一个空间小孔,选通出成像目标频谱面上的低频成分,也就是可以用来成像的最早到达光,实现空间上的选通。CCD 放置在 L_2 的后焦面上。由 L_2 将克尔快门选通出的频谱再作一次反傅里叶变换,成像于 CCD 上。再将图像数据输入微机,即可以进行图像处理。实验中分别透过厚度为 55mm、浓度为 0.25% 的聚苯乙烯和 1% 的内脂的散射液体,用鉴别率板作为成像目标,对 0.25mm,0.5mm,1mm 的分辨率都得到了理想的结果。

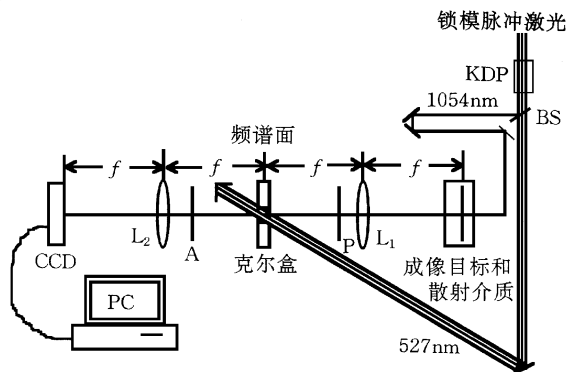


图 1 克尔快门选通成像技术光路安排
(CCD 为致冷的或像增强的电荷耦合器件;P 为起偏器;A 为检偏器; L_1 、 L_2 是焦距为 60cm 的傅里叶变换透镜;KDP 为倍频晶体;BS 为分束镜)

克尔快门时间空间选通成像技术可以实现二维成像,分辨率也较好,但是需要较大功率的激光系统。

3 共焦扫描条纹相机成像技术

早期的共焦扫描技术是直接用量计来测量从散射介质透射出的光的强弱,通过逐点扫描即可得出目标的像^[5],后来有人用 CCD 来探物理

测出射光,而且只选择在入射光直线上的像素的灰度值作为测量值^[6,7],也有人采用在这个像素周围取一个合适的窗口,在窗口内对灰度值进行平均,把平均的灰度值作为测量值,通过逐点扫描得出目标的像.这实际上是作了一次低通空间滤波,只选通出低频光成像,而把高频散射光滤掉.

90年代初,K. M. Yoo^[8]以及 J. C. Hebd-en^[5,9]所在的两个研究小组采用条纹相机超快选通技术,与共焦扫描技术结合起来,设计出了共焦扫描条纹相机选通成像技术.该方法采用条纹相机来探测从散射介质出射的激光脉冲,再通过数学处理,得出最早到达光的积分强度,实现时间上的选通,通过逐点扫描得出目标的像,光路安排如图2所示.从超短脉冲激光器发出的飞秒脉冲激光,主要部分作为探测光通过长焦距透镜 L_1 聚焦(会聚为直径小于0.3mm的光斑)在散射介质上,一部分入射到条纹相机同步扫描单元的光电二极管上,使条纹相机的扫描频率与飞秒脉冲激光器的重复频率相同,另一部分作为条纹相机探测光的参考光,它可以为散射介质的出射脉冲在时间上提供一个绝对标准,以作比较.中性滤波片用来衰减参考光的强度,以使它的强度可与探测光比较.待测样品置于电动平台上,使样品的入射表面垂直于光束,样品的出射表面通过透镜 L_2 聚焦于条纹相机上,电动平台可带动样品垂直于光束移动.直径1mm相距0.5m的两个小孔置于样品和条纹相机之间,以使条纹相机只能探测到沿入射光方向透射的光.

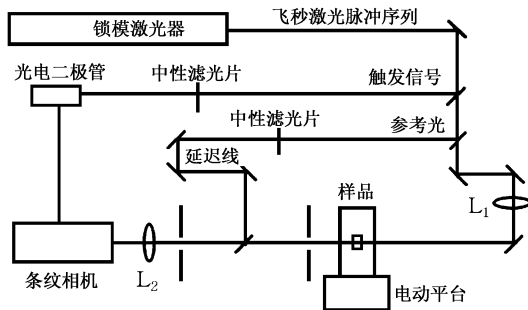


图2 共焦扫描条纹相机成像技术
(L_1 为焦距200mm的透镜)

使整个系统步进扫描,在电机带动样品移动的同时,用条纹相机采集数据,将会得到一系列的探测信号的强度-时间曲线.在文献[8]中,样品是在26mm厚的瘦鸡肉中夹着2mm厚的肥鸡肉,肥鸡肉宽度是5mm,典型的曲线如图3(a)(背景已被减掉)所示.由此可以看出,由于肥肉散射较强,较早到达光部分的强度比瘦肉的小.

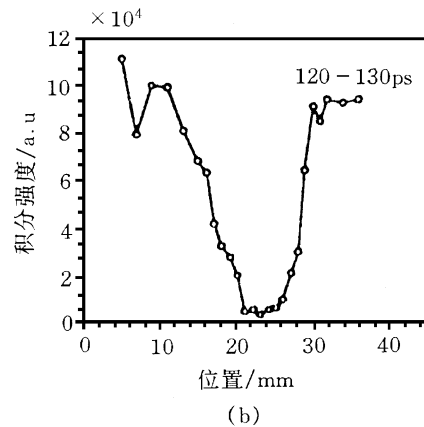
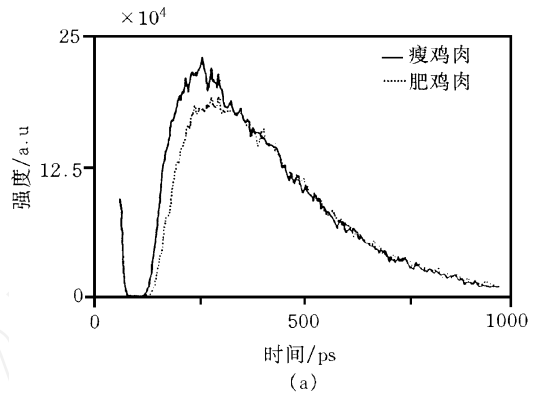


图3

- (a) 散射介质出射光脉冲的强度-时间曲线;
- (b) 时间分辨的目标的像

将这些曲线的参考光脉冲在时间轴上移到同一点,然后把曲线的强度对时间积分,积分时间的起点为探测信号的起始点.随着积分上限的不同,将得到相应的时间区间内的信号的积分强度.如果积分的时间段对应于最早到达光的时间段,那么积分强度对应着最早到达光的积分强度,把所有曲线的对应于最早到达光的时间段的积分强度逐点连接起来,就可得到样品的扫描像.对于上述的样品,当积分区间是

120—130ps 时,得到的积分强度随位置变化的曲线如图 3(b)所示.由此可以看出肥肉在瘦肉中的位置,实现时间选通成像.

这种成像技术只有通过扫描才能获得目标的图像(二维成像更麻烦),对扫描得到的出射光脉冲的强度-时间曲线,必须进行积分处理,成像过程复杂.此外,它的时间分辨率受到条纹相机分辨率的限制,只能达到几个皮秒量级,空间分辨率受到扫描过程的限制,一般也较低.但是,这种技术的探测深度较大.

4 非线性二次谐波产生-互相关选通成像技术

非线性二次谐波产生-互相关选通成像技术实际上也是一种共焦扫描技术,只是在选通方法上有所不同.这种成像技术的理论依据是,从散射介质出射的光子中,只有弹道光子和蛇行光子与参考光脉冲具有很好的相关性,利用互相关技术可选通出这部分对成像有用的光子.美国的 K. M. Yoo^[10]及国内天津大学王清月^[11]领导的研究小组在这方面进行了研究,实验光路如图4所示.激光器发出的飞秒激光脉

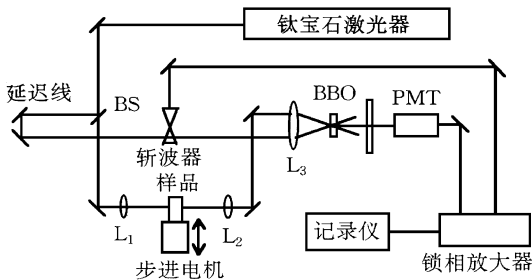


图4 互相关选通成像技术光路安排

(BS为分束镜;PMT为光电倍增管;BBO为倍频晶体;
L₁,L₂是焦距为10cm的透镜;L₃是焦距为5cm的透镜)

冲由分束器分为两束,从BS反射的光脉冲作为参考光,经过光学延迟线,再经过透镜L₃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L₁聚焦在盛有散射介质的样品盒中,将样品置于光束的焦点位置,以提高空间分辨率.样品盒置于由步进电机带动的平台上,平台移动

的方向垂直于光脉冲的入射方向.从盒中出射的光脉冲由透射系统L₂和L₃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,使参考光与散射介质中出射光脉冲的前沿即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.当电机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.在文献[11]中,分别透过厚度为24mm、浓度为1.5%—4.5%的奶液、2mm的苹果片、1mm的猪肉组织切片成像,得到了较好的结果,分辨率大约为2mm.

这种选通技术与共焦扫描条纹相机成像技术相比,成像过程比较简单,但也只有通过扫描才能得到目标的像,分辨率受到扫描过程的限制,一般较低.

5 电子学全息选通成像技术

电子学全息选通成像技术是通过全息干涉过程实现的,美国的 E. Leith 领导的研究小组在这方面作了大量的深入的研究工作^[12—15],其原理如图5所示.由钛宝石锁模激光器发出的飞秒激光脉冲进入全息光学系统,由半反射镜BS分为物光束和参考光束,物光束通过成像目标、散射介质和一个空间滤波器系统,由一个半反射镜使物光和参考光会合,再通过一个成像系统将散射介质的出射表面成像于CCD靶面上,调节参考光路中的延迟线,使参考光脉冲与最早到达光同时到达CCD靶面,干涉形成全息图^[2],而后续到达光在空间上没有与参考光相遇,不能形成干涉条纹,只形成模糊的亮背景.由于CCD分辨率很低,为了使物光和参考光形成较低空间频率的干涉条纹,以适应CCD的要求,在光路中有一空间滤波系统,滤去高频散射光,而且使物光与参考光夹角很小.另外,参考光路中有一个透过率连续可调的中性衰减片,可调节参考光强,以形成对比度较好的干涉条纹.

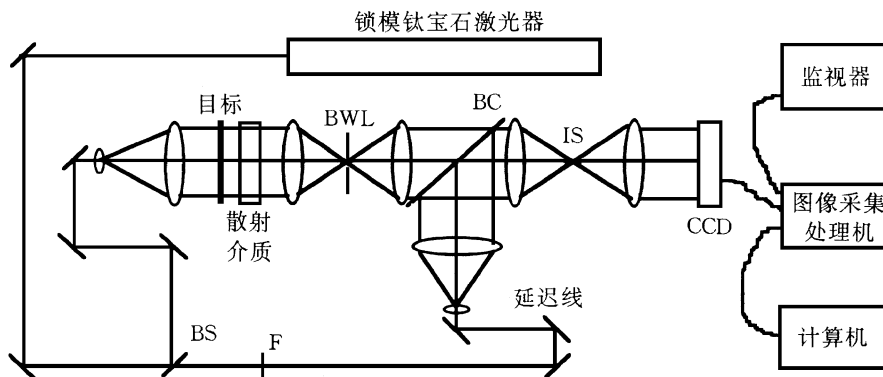


图5 电子学全息选通成像技术原理图

(BS 为分束器;BC 为合束器;IS 为成像系统;BWL 为低通空间滤波器;F 为中性滤光片)

CCD 把全息图数据输入微机,通过微机把全息图以类似于光学再现的方式进行数字化处理.首先将全息图数据进行傅里叶变换,得到其频谱,再作滤波处理,只保留一级衍射项,并在频域中进行坐标平移,再进行反傅里叶变换,即得到再现像。

散射光在 CCD 靶面上形成的亮背景在全息图中以直流成分出现,通过滤波处理将其滤掉,而只有最早到达光与参考光干涉形成的全息图的一级衍射项可产生目标的像.这样,通过全息技术将最早到达光从散射光中分离出来,实现了选通成像。

但是,在记录的全息图中,非常微弱的最早到达光信号叠加在很强的后续到达光亮背景中,再现像信噪比很低.为了进一步提高信噪比,可以将多幅全息图再现像叠加处理,前提条件是多幅再现像的散斑背景噪声之间互不相关。

H. Chen 和 E. Leith^[13,14]等人用这种技术分别透过 6mm 厚的鸡肉和 6mm 厚的人手肌肉组织,对 0.55—2mm 的金属丝成像,得到了较好的结果,为光学层析在医学上应用做了初步准备.我们在这方面也做了些工作,得到了一些初步的结果¹⁾.[16].在文献[17]中,以自锁模钛宝石激光器为光源(脉冲宽度为 20fs),透过厚

度为 12mm、体积百分比为 5% 的鲜奶和水的混合散射液体,对直径为 0.65mm 的金属丝成像,得到的图像如图 6 所示。



图6 飞秒脉冲激光电子学全息选通得到的金属丝的图像

飞秒脉冲激光电子学全息选通成像技术在透过高散射介质(如生物组织)成像方面有着很好的发展前景.它有着很强的优势:如二维成像,所需光源功率低,光路易于调节,能连续地、较快地产生多幅全息图,以便进行多幅再现像叠加平均,提高信噪比,图像处理也非常方便.时间选通宽度就是入射脉冲的宽度,可达几十到几百飞秒量级,空间分辨率也可达到亚毫米级.但是,CCD 的分辨率很低,使得物光和参考光之间的夹角很小,全息图的干涉条纹只有 15 条/mm 左右,这将限制成像质量和系统分辨率的提高,即使 CCD 像素数增加,也将受到计算机存贮能力和运算能力的限制,而且探测深度较小,有待于进一步提高。

(下转第 167 页)

1) 参阅侯比学、成铎、陈国夫的“透过高散射介质成像的超短脉冲激光电子学全息系统”一文,该文将在 1999 年第 6 期《中国激光》上发表

板(如直径大小、接地状况)对放电模式影响非常大,他认为这是不可理解的.在研究密度与磁场关系的实验时,他还发现在很低的磁场处($B_0 \sim 2 \times 10^{-3} \text{T}$)有一个密度峰,他确认这是电子回旋峰,因而提出一个新的设想,即射频波 ECR 离子源,如果这种设想可行的话,那么建造一台 rf ECR 将比微波 ECR 离子源经济多了.

在不断涌现的问题当中,最富有挑战性意义的就是为什么螺旋波放电具有极高的电离效率以及右旋螺旋波远较左旋螺旋波占主导地位.在一系列低气压、高密度等离子体源中,螺旋波激发等离子体源是人们所赋期望值最高的,它已成为世界研究热点,我们希望通过本文的介绍能引起有关研究者的关注.

参 考 文 献

[1] J. P. Klosenbergl, B. McNamara, P. C. Htonemann, *J. Fluid. Mech.*, **21**(1965) ,545.
[2] R. W. Boswell, *Phys. Lett. A*, **33**(1970) ,457.

[3] R. W. Boswell et al. , *Phys. Lett. A* , **91**(1982) ,163.
[4] F. F. Chen , Australian National University Report ANU - PRL IR85/ 12 ,(1985) .
[5] A. Komori , T. Shoji et al. , *Phys. Fluids B* , **3**(1991) , 893.
[6] A. R. Ellingboe , R. W. Boswell , *Phys. Plasma* , **3** (1996) ,2797.
[7] Michael A. Lieberman , Allen J. Lichtenberg , Principles of Plasma Discharges and Materials Processing , John Wiley & Sons , Inc. , New York (1994) , 440.
[8] F. F. Chen , *J. Vac. Sci. Technol. A* , **10**(1992) ,1389.
[9] K. Yamaya , Y. Yamaki et al. , *Appl. Phys. Lett.* , **72** (1998) ,235.
[10] T. Minami , H. Sato , et al. , *Jpn. J. Appl. Phys.* , part2 , **31**(1992) ,L257.
[11] R. W. Boswell , D. Henry , *Appl. Phys. Lett.* , **47** (1985) ,1095.
[12] P. Zhu , R. W. Boswell , *Phys. Fluids B* , **3**(1991) ,869.
[13] A. Ellingboe , R. W. Boswell , *Bull. Am. Phys. Soc.* , **39** (1994) ,1460.
[14] Keiji Nakamura et al. , *Jpn. J. Appl. Phys.* , **34**(1995) , 2152.

(上接第 177 页)

另外,还有其他的一些选通成像技术,例如吸收选通法^[17]、空间滤波法、受激 Raman 散射增益法^[18]和其他的一些可产生互相关项的非线性光学现象^[19]都可以实现选通.

参 考 文 献

[1] K. M. Yoo , R. R. Alfano , *Opt. Lett.* , **15**(1990) ,320.
[2] 侯比学、陈国夫,光子学报,**27**(1998) ,317.
[3] L. Wang , P. P. Ho , X. Liang et al. , *Opt. Lett.* , **18** (1993) ,241.
[4] L. Wang , P. P. Ho , R. R. Alfano , *Appl. Opt.* , **32** (1993) ,5043.
[5] J. C. Hebden , R. A. Kruger , K. S. Wong , *Appl. Opt.* , **30**(1991) ,788.
[6] D. S. Dilworth , E. N. Leith , J. L. Lopez , *Appl. Opt.* , **29** (1990) ,691.
[7] 侯比学、成 铎、陈国夫,光子学报,**27**(1998) ,212.
[8] B. B. Das , K. M. Yoo , R. R. Alfano , *Opt. Lett.* , **18** (1993) ,1092.

[9] J. C. Hebden , *Appl. Opt.* , **32**(1993) ,3837.
[10] K. M. Yoo , Qirong Xing , R. R. Alfano , *Opt. Lett.* , **16** (1991) ,1019.
[11] 张伟力、邢歧荣、陈 野等,光学学报,**17**(1997) ,1624.
[12] E. Leith , E. Arons , H. Chen , et al. *Optics & Photonics News*, Oct. (1993) ,19.
[13] E. Leith , H. Chen , Y. Chen et al. , *Appl. Opt.* , **30** (1991) ,4204.
[14] H. Chen , M. Shih , E. Arons , *Appl. Opt.* , **33**(1994) , 3630.
[15] H. Chen , Y. Chen , D. Dilworth et al. , *Opt. Lett.* , **16** (1991) ,487.
[16] 侯比学、陈国夫、丰 善等,光学学报,**18**(1999) .
[17] K. M. Yoo , Feng Liu , R. R. Alfano , *Opt. Lett.* , **16** (1991) ,1068.
[18] M. D. Duncan , R. Mahon , L. L. Tankersley et al. , *Opt. Lett.* , **16**(1991) ,1868.
[19] M. Bashkansky , J. Reintjes , *Appl. Opt.* , **32**(1993) , 3842.