

瞬态光学及其进展

侯 洵

(中国科学院 西安光机所, 陕西 西安 710068)

摘 要: 扼要介绍了瞬态光学的研究内容及其进展, 着重论述了高速摄影和超短脉冲激光技术及其应用。

关键词: 瞬态光学; 高速摄影; 超短脉冲激光; 超快现象

中图分类号: TN21; TB872

文献标识码: A

文章编号: 1003-4978(2002)01-0001-07

Transient Optics and Its Progress

HOU Xun

(The Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China)

Abstract: The transient optics consisted mainly of high speed photography and technology of ultrashort laser pulse and its progress are briefly described in the paper. The paper describes also application of the transient optics.

Key words: transient optics; high speed photography; ultrashort pulse laser; ultrafast phenomena

瞬态光学研究瞬态现象的光学诊断手段及瞬态过程伴有的光学现象。瞬态现象的变化有快有慢, 因而研究它们的光学手段也不同。研究变化较慢的瞬态现象或过程, 例如以位置变动或(和)几何形态变化为主的现象的光学手段是高速摄影; 研究超高速现象或超快过程的手段是基于超短脉冲激光的各种时间分辨光谱技术。本文对瞬态光学的介绍侧重于高速摄影和超短脉冲激光技术。

1 高速摄影

人眼的视网膜有 $1s/24$ 的视觉暂留效应, 所以人眼的时间分辨能力只有 $1s/24$ 。电影摄影与放映的频率选为 24 帧/s, 正是利用了这一特点, 以不连续的放映使人获得连续的感受。但对于许多瞬变现象, 受到眼睛时间分辨率的限制, 我们却只能看到变化前、后的结果, 而看不清过程。高速摄影是一种以高于电影拍摄频率摄影的技术, 当拍摄结果以电影放映频率放映时, 现象的变化就被放慢了。

1.1 高速摄影技术及其发展

高速摄影综合使用光、机、电、光电传感器与计算机等一系列技术。所有使用几何光学原理及高速动作的机械机构实现对快速现象观测记录的设备, 统称为光机式高速相机。根据相机工作的原理, 光机式高速相机分为间歇式、光学补偿式和转镜式。三种相机的拍摄频率依次大幅度增高。间歇式相机的底片在抓片机构和定位销的配合动作下做间歇式运动, 在曝光时静止。由于底片的机械强度有限, 间歇式相机的拍摄速度最高约为 360 帧/s。光学补偿式相机的底片连续高速移动, 利用光路中的旋转棱镜补偿掉曝光时图像在底片上的移动。由于底片从静止加速到一定的高速移动状态需要耗费大量片长, 所以光学补偿式相机的拍摄速度也是有限的, 通常在 11 000~12 000 帧/s。转镜式相机的底片是静止的, 布

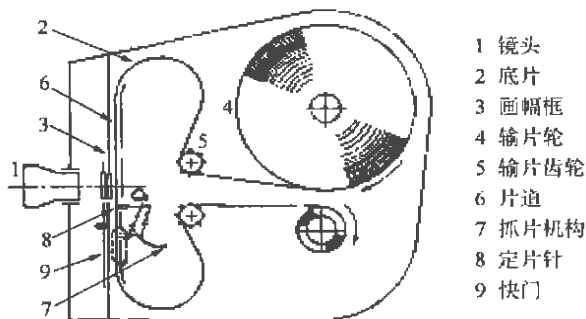


图 1 间歇式高速相机原理示意图

收稿日期: 2002-03-16

作者简介: 侯洵(1936—), 男, 陕西咸阳人, 中国科学院院士, 研究员, 河南大学物理系名誉主任。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

置在大体圆形的底片架上. 相机的光学系统包含一个处于底片所在圆圆心的高速旋转反射镜, 它使光束在底片上成像并扫描, 完成高速拍摄. 若在光学系统中放置一个狭缝, 先将目标成像在狭缝上, 然后再经旋转反射镜将狭缝成像在底片上, 经扫描后所形成的是一个条带. 条带的宽度反映目标在垂直于扫描方向上尺寸随时间的变化, 其光密度则反映目标发光强度随时间的变化, 这种相机称为条纹相机或扫描相机; 若在底片前方放置一排小透镜, 则在底片上形成一系列二维图像, 这种相机称为分幅相机, 其最高拍摄速度可达 2 000 万幅/s. 三类光机式高速相机的工作原理如图 1, 图 2, 图 3 所示^[1].

光机式高速相机在 20 世纪 70 年代末已经发展得十分成熟, 并在 A. Dubovikde 的“高速过程的照相记录”中有仔细深入的论述. 由于这类相机的拍摄速度都分别达到了它们所使用的机构和材料的极限, 所以自 80 年代以来这三类相机的技术没有什么显著的进步, 相反, 中低速相机, 即间歇式高速相机和光学补偿式高速相机, 已逐步为高速视频录像所取代.

所有使用电光、光电效应以及脉冲电光源的高速相机统称光电子类高速相机. 这类相机还可以细分为闪光高速摄影、高速视频录像与变像管高速摄影相机. 闪光高速摄影是在黑暗中利用持续时间很短的闪光照明拍摄对象而使底片曝光的摄影, 它的闪光比我们日常照相时在光线暗的场合使用的闪光灯的闪光持续时间短得多. 闪光可以是火花放电、脉冲氙灯, 也可以是脉冲激光. 当使用 X 射线闪光时, 称为射线高速摄影. 射线高速摄影可以透视拍照某些利用可见光无法直接观察、记录的快速现象, 如炮筒内炮弹的运动等, 也可以避开烟雾、火光的干扰, 因此常用于研究弹在内弹道及中间弹道运动的情形. 高速视频录像出现于 20 世纪 70 年代末, 最初使用摄像管和高速录像带, 拍摄频率为 200~2 000 幅/s, 80 年代中发展至 12 000 幅/s. 此后, 特种高帧频光电成像器件(自扫描光电二极管阵列 SSPD)或特种 CCD 逐步取代了摄像管, 超大容量集成电路存储器芯片代替了由多隙磁头、高密度磁带与精密高速机械传动机构组成的高速图像数据记录系统, 整个系统以计算机为核心, 实现了全数字化, 不仅拍摄速度、存储速度与存储容量均有大幅度提高, 而且增加了图像增强功能和多种对图像信息的处理, 可以实现在弱照度下的拍摄, 并十分方便地实现实时观察与记录、单幅显示、逐格放映及连续放映. 上述优点加上无噪音(没有运动的机械部件), 使它逐步取代了中低速的高速相机.

光机式高速相机拍摄速度的提高受到其高速运动零部件的机械强度和惯性的限制, 无论国际国内都已经达到了极限值. 为了进一步提高拍摄速度, 人们使用了宽束光电成像器件——变像管, 利用惯性极小的电子束在电磁场的作用下的通、断与扫描实现高速摄影. 使用变像管形成高速摄影的技术称为变像管高速摄影^[2,3]. 变像管由光阴极、电子光学系统及荧光屏组成. 当光学图像照在它的光阴极上时, 光阴极即发出一个电子密度与光强相应的电子图像, 这个电子图像经电子光学系统聚焦成像在荧光屏上就重新转换成一个与原来的光学图像相同的可见光图像. 利用电或(和)磁场可以使电子束偏转或中断, 从而形成分幅或条纹高速摄影. 变像管的聚焦可以单用静电场或静磁场, 或者联用电场和磁场. 变像管高速摄影机的种类很多, 除就功能可以划分为条纹相机和分幅相机、单次扫描与同步重复扫描相机外, 还可以按光阴极的响应波段分为红外、可见、紫外、X 射线高速摄影机. 分幅相机按实现的方法, 可以分为单管联用多通道分幅相机、电子束扫描分幅相机、光学分幅电子开关分幅相机和微通道板微带线选通分幅相机等. 由于电子的惯性极小, 条

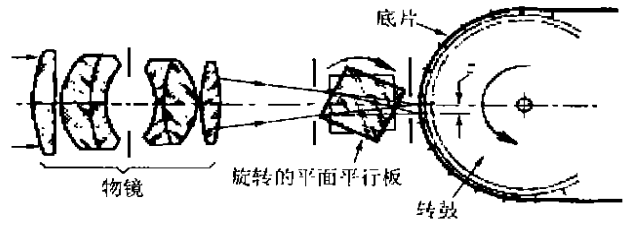


图 2 棱镜补偿式高速相机原理示意图

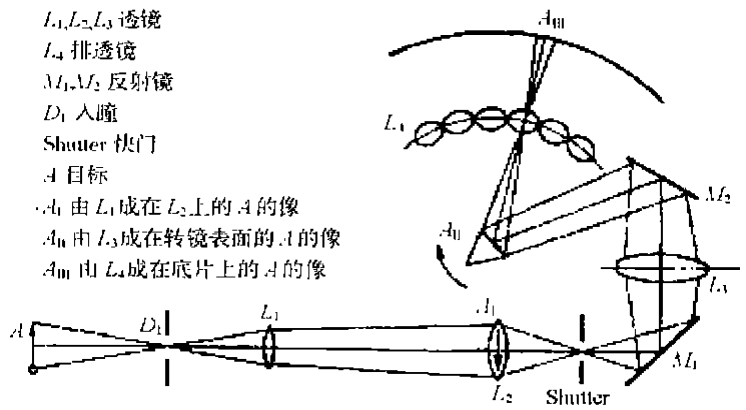


图 3 分幅速率为 15×10^6 幅/s 的 Brixner 高速相机
(基于转鼓及光机补偿原理)

纹变像管相机的最高时间分辨率已经达到亚皮秒(10^{-13} s),电子扫描分幅相机的拍摄速度已达 $6 \times 10^8 \sim 5 \times 10^9$ 幅/s(依画幅数多少不同而不同).微通道板微带线选通的分幅相机的单幅曝光时间已低至 60 ps,画幅总数可达 12~16 幅.当用相互平行的微带线时,两微带间的时延可以有较大的变动.典型的高速摄影用的变像管如图 4 所示,其中(a)为西安光机所在法国 OBD1105 基础上自行设计的 305 管.

表征高速摄影用的变像管的主要参数有:光阴极的量子效率,光阴极的面电阻,光阴极的光谱响应范围,空间分辨率,偏转板灵敏度,荧光屏种类等.表征变像管高速摄影机的主要参数是:极限时间分辨率,空间分辨率,动态范围,最小可探测能量密度等.客观世界中除物体形态、位置、亮度等的变化明显可见之外,还有一些物理量是人眼看不见的,例如温度的分布、密度的分布、压力的分布、应力的分布等.人们发展了若干显现这些物理量的分布及其变化的技术,例如阴影、纹影或干涉摄影术,称之为可见化技术或流场显示技术.它们总的说来都是基于折射率的变化与透明介质的密度、温度或者应力之间的关系的.密度、温度或者应力的变化引起介质折射率的变化,形成与它们的分布相应的阴影、纹影或干涉图案.

我国高速摄影机的研制可以上溯至上世纪 50 年代,然而大规模的研究开始于 1963 年,受国防科技研究需要的牵引,发展很快.到 80 年代末,我们已经研制成功几乎所有类型的光机式高速相机和主要类型的变像管高速相机,并达到了国际先进水平^[7].

1.2 高速摄影的应用

高速摄影可以应用于一切我们想要探究的瞬态现象,最直观也最常见的是用于体育运动与国防科技的研究^[5,8].体育动作的分析及生物力学研究通常使用间歇式高速摄影机,其拍摄频率上限为 360 帧/s.国防科技方面,爆炸、燃烧、穿甲、弹道、飞行姿态等的研究都离不开高速摄影,其中核爆炸的研究更需要超高速的高速摄影机.当研究链式裂变反应的初期状况时,甚至需要皮秒时间分辨能力的变像管条纹相机与分幅相机.

高速阴影、纹影、剪切干涉及全息干涉摄影是研究高速流场的最直观最有效的手段.它们可以显示温度、压力、密度、应力等的分布及其快速变化,对航空、航天、火工品、爆轰物理及常规武器研究十分重要.

当需要研究快速的理化过程时,常常用高速摄影机与光谱仪组成时间分辨光谱设备,用来获取目标发射或吸收的光谱的强度随时间的变化.当过程变化非常快或发光较弱时,人们用变像管高速条纹相机与光谱仪组成具有光增益的时间分辨超快速光谱仪,获取过程的发射光谱、吸收光谱、荧光光谱图,藉以研究各种超快速的物理、化学及生物过程.

2 超短脉冲激光技术

脉冲激光技术自 1965 年用被动锁模红宝石激光器获得皮秒级脉冲而进入超短范围以来,发展十分迅速.20 世纪 70 年代中出现了碰撞锁模环形染料激光器,使激光脉冲的宽度进入飞秒范围.80 年代中,碰撞锁模环形染料激光器的脉冲宽度达到了 27 fs.1986 年,中科院西安光机所的陈国夫同志在英国进修期间,利用碰撞锁模环形染料激光器创造了 19 fs 的当时国际最短记录.1990 年,国际上出现了被动锁模钛宝石飞秒激光器^[9].钛宝石增益带宽宽,因而调谐范围宽(650~1 100 nm),适用于产生超短脉冲(理论上可以支持产

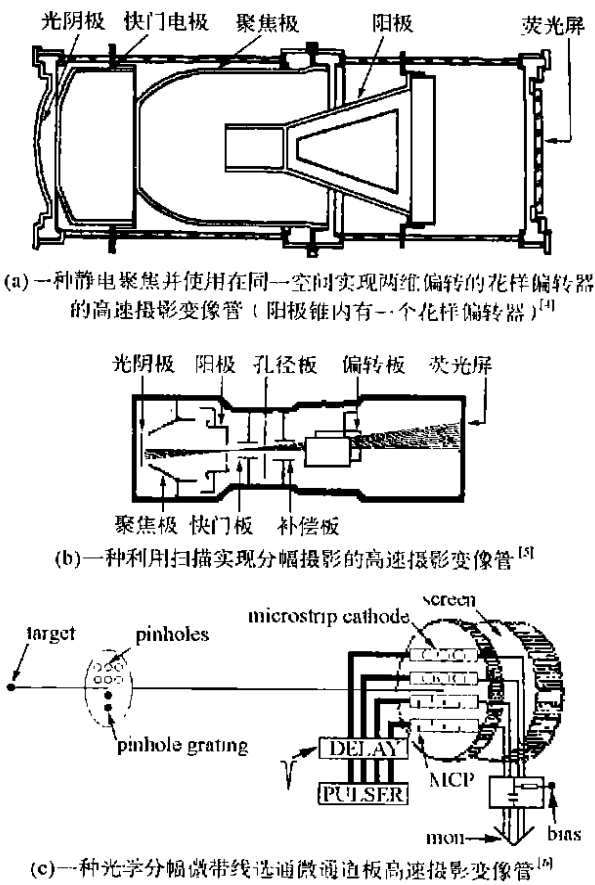


图 4 三种有代表性的高速摄影变像管的结构及工作原理示意图

生 3 fs 的脉冲), 由它构成的飞秒激光器可靠性高、使用方便, 掀起了国际上发展飞秒激光技术与应用飞秒脉冲的热潮. 1995 年, 钛宝石固体飞秒激光器产生的脉冲宽度降至 8 fs^[10]; 1996 年, 西安光机所的许林在奥地利产生了 7.5 fs 的超短激光脉冲^[11]; 1996 年, 毕业于西安光机所的魏志义博士在荷兰创造了全固态腔倒空压缩后 4.5 fs 的记录^[12]; 1998 年, 西安光机所的程昭则在奥地利利用亚毫焦耳的 25 fs 的脉冲产生了强白光连续谱, 将其近红外部分用超宽带啁啾镜腔外压缩, 获得了 4 fs 的最佳结果^[13]. 这些都是当时的国际最高指标.

2.1 超短脉冲激光技术当前达到的水平

超短脉冲激光技术当前达到的水平大体如下:

(1) 钛宝石激光器直接产生的脉冲宽度已缩小到了 5 fs, 经过压缩的近红外波段的最短脉冲为 4 fs, 而在软 X 射线波段 M. Drescher 等人利用高次谐波法产生了 1.8 fs 的软 X 射线超短脉冲^[14], 最近更报导了 600 as (10^{-18} s) 的软 X 射线脉冲^[15]. 经过放大、压缩, 人们已经得到了输出脉宽 5 fs, 单脉冲能量 5 nJ, 重复频率 1 MHz 和脉宽 5 fs, 单脉冲能量 0.5 mJ, 重复频率 1 kHz 的超短脉冲激光.

(2) 出现了用半导体激光器(LD)泵浦的全固体化的飞秒激光器, 使飞秒激光器体积更小、工作更稳定、寿命更长、使用更方便. U. Keller 对 1995 年以前这方面的进展有一个较全面的综述^[16].

(3) 开发了多种激光介质和放大介质, 除 Ti:Sapphire 外, 尚有 Cr^{3+} :LiSAF, Cr^{3+} :LiCAF, Cr^{4+} :YAG, Nd:YVO₄ 等; 发展了宽调谐的飞秒 OPO 及 OPA, 拓宽了飞秒激光的波长可调谐范围. 目前, OPO 的频率已可覆盖 178 nm~20 μm , 而 OPA 则可以做到 6.3 fs, 5 J, 波长 550~700 nm 和 4 fs, 1 J, 波长 900~1 300 nm.

(4) 出现了全光纤的超短脉冲激光器^[17].

(5) 发展了单次或重复频率 10 Hz 的桌上型太瓦级固体飞秒激光器, 取代了原来体积庞大、价格昂贵、投资高出数十倍的高功率飞秒激光系统. 这类系统的峰值功率 1998 年已达 100 TW 以上, 可以提供 $3 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$ 的功率密度^[18], 为开展强场物理创造了条件. 目前, 已经利用 25 fs 的高功率激光脉冲在氦气中实现了 221 次的高次谐波, 从而获得了相干的可调谐的已进入水窗范围的 X 射线.

2.2 超短脉冲激光技术的发展趋势

(1) 向更短的脉宽迈进, 例如试图获得 Ti:Sapphire 的 3 fs 的极限脉宽; 寻求新的介质、机理和技术、向阿秒(10^{-18} s)时域迈进.

(2) 发展半导体激光器(LD)泵浦的全固体飞秒激光器, 包括飞秒光纤激光器和高功率的系统. 研制端面发射的飞秒 LD 列阵器件、完善 DFB Laser.

(3) 发展桌上型数十太瓦(TW)可调谐飞秒激光系统, 为在普通实验室开展强场物理及惯性约束快点火创造条件.

(4) 扩展飞秒激光的波长范围. 利用各种方法, 包括变换激光介质, 使用多种频率变换技术, 把飞秒激光的波长向软 X 射线及中红外、甚至远红外方向扩展, 以适应多种学科的使用要求.

总之, 当前超短激光脉冲技术正在继续朝超短、超强、超宽带和更紧凑的方向发展, 向阿(10^{-18})秒、拍(10^{15})瓦进军, 并日益与纳米级的显微技术相结合.

2.3 超短激光脉冲技术的应用

作为瞬态光学的一部分, 超短脉冲激光技术一个重要进展是大大扩展了它的应用.

超短脉冲激光的最直接的应用就是人们利用它作为光源, 形成了多种时间分辨光谱技术和泵浦/探测技术. 例如, 时间分辨荧光光谱技术, 差吸收光谱, 反射光谱, 时间分辨拉曼光谱, 泵浦/探测技术, 飞秒条纹相机, 全光取样/电光取样测量, 电吸收取样技术, 交叉相位调制技术, 超高时间分辨扫描探针显微技术, 超快光导探针(3.5 ps, 亚微米空间分辨率, 亚 100 nV 电压分辨率). 这些信息的超快速获取是以超短脉冲激光为探针的, 激光脉冲宽度决定了它的时间分辨率.

信息的超快速获取使我们有可能研究凝聚相体系中自由基、溶剂化电子、激发几何异构化、光电离、光解、能量的辐射与非辐射转移等. 这些与信息的产生、传递、存储、太阳能的转换与存储(光合作用)、肿瘤的形成和消失、衰老过程、药理作用、材料的辐射损伤与改性、同位素的富集与分离以及环境污染的治理等均密切相关. 对于凝聚相体系中上述过程的研究将使人类对物质微观过程的认识实现一次飞跃, 从而对信息技术、材料、能源、环境保护与人类保健的进步做出重大贡献. 超短脉冲激光与超快速信息获取技术的发展直

接带动物理、化学、生物、材料与信息科学的研究进入了微观超快过程领域,并开创了一些全新的研究领域,如飞秒化学、量子控制化学、半导体相干光谱、高/超高强度科学与技术等^[19,20].

物理化学家利用飞秒激光泵浦/探测技术研究化合物光解时过渡态动力学的实时过程、波包的运动、团簇的多光子电离动力学、表面的吸附、脱附或解离的动态过程以及分子内的传能过程. 各国科学家对溶液、蛋白质与大分子的电子传递、溶剂化效应、碰撞传能及溶质分子的光解动力学等开展了广泛的研究. 飞秒激光技术的发展还为化学家提供了以特定的光脉冲(特定波长、偏振状态、宽度、强度、波形)控制化学反应的可能性. 这方面的研究是国际上又一个热点,并已在单分子光解、激光控制化学反应这两方面做出了一些实验与理论工作.

飞秒脉冲激光与纳米显微术的结合使人们可以研究半导体的纳米结构(量子线、量子点、纳米晶体)的载流子动力学,包括半导体中瞬态电子在高电场中的输运,灼热电子的弛豫和隧穿以及光与物质相互作用的动力学;可以测量大规模集成电路中任意点的瞬态电压以及纳米电子器件中的电荷、电压的瞬态现象等. 这对于搞清限制高速电子、光子与光电子器件的高速性能的物理机制提供了强有力的工具.

在生物学方面,人们正在利用飞秒激光技术所提供的差异吸收光谱、泵浦/探测技术研究光合作用反应中心的传能、转能与电荷分离过程. 光合作用是地球上规模最大的、关系到人类面临的粮食、能源、资源与环境等问题的太阳能利用工程,对其中涉及到光子、激子、电子与离子的传递与转化的复杂理化过程的了解,将能揭示自然界这一独特的高效吸能、传能和转能过程的机理,为提高农作物的产量以及用仿生学方式在能源和信息方面加以应用提供理论依据并指出开发途径. 除研究光合作用外,在人类视觉过程的机理探索、DNA中的能量转移的研究以及外科手术^[21]等方面,超短脉冲激光也都起着重要作用.

人类提高时间分辨率的不懈努力导致激光脉冲宽度的不断缩短,然而超短脉冲激光技术不仅为科学研究提供了各式各样以它为基础的超快速测试手段,而且超短脉冲激光技术的发展还使人们得以获得超强的激光. 它超强的电场与磁场为研究光与物质的相互作用提供了前所未有的极端条件,并由此诞生了一门新的物理学分支——强场物理,不过这已经超出了瞬态光学的范围,亦即超出了本文的范围. 这里只需要提一下:啁啾脉冲放大(CPA)技术产生的超短超强脉冲激光还可能开辟多种强场科学技术,例如带电粒子的超强场加速、惯性约束聚变(ICF)的快速点火、超精细加工(脉冲愈短,被加工对象的破坏阈值愈低,加工的精度愈高)等. 人们还可以利用超短强激光脉冲与半导体光电开关产生THz辐射. 后者因为频带很宽而具有反隐身能力,这不仅在军事上有重大应用前景,同时在生物医学和探地雷达等方面也有潜在的重要应用.

超短脉冲激光的另一重要应用是在信息的传输、处理与存贮方面.

进入本世纪以来,先进国家的通信已进入Tbit/s范围,进一步的提高,有关器件将运行在皮秒时间尺度. 在这个尺度内,载波脉冲宽度与载体物质(光纤、光盘、各种光子器件)的原子、分子的运动周期相当,光与物质相互作用的量子特征将成为信息科学中的基本问题. 这一基本问题的研究成果会为信息的海量存储、处理与海量传输的硬件技术提供科学基础. 然而,与这一问题有关的现象都发生在皮秒甚至飞秒时域,只有飞秒脉冲激光技术才能提供研究它们的手段. 例如,要实现通讯与信息处理速率从Gbit/s到Tbit/s的阶跃,必须解决通讯用的超短脉冲激光光源并开发出响应速度达到至少皮秒时域的光调制器、光开关、光探测器以及OTDM和ODWDM等一系列超短光脉冲的产生、放大、调制、开关、复用及解复用技术器件. 为此,人们正在借助飞秒激光与光电子技术所提供的探测技术深入研究半导体低维材料(量子线、量子点、纳米晶体)中的载流子动力学,测量大规模集成电路的瞬态电压以及纳米电子器件中的电荷、电压的瞬态现象,以便搞清限制上述器件速度提高的机制,找出改进的途径或新器件的原理. 这方面的研究已经成为超快现象研究的热点,充分体现在最近一次超快现象会议和国际飞秒技术讨论会的内容上. 提高光通信速率与容量的另一方面的努力,表现在对光纤飞秒激光器、光纤孤子激光器和光纤非线性光学器件的研究上.

超短脉冲激光在通信领域的应用除光纤通讯这一“有线”形式之外,还有自由空间光通信(卫星对卫星的通信)与大气中的光通信(卫星对地面、地面对卫星、飞机对飞机)等“无线”形式. 激光通信相对于无线电通信具有通信信道多、抗干扰能力强、不易被截获、保密性强等优点,在构成军用天基信息网方面有明显的优势. 西方国家一直在研究它的特殊问题——跟踪瞄准与避开云雾,而大功率的超短脉冲激光源,超高速光调制器与探测器也是实现“无线”光通信的关键.

光开关作为光信息系统中实现大容量信息在网络光路中高速分组切换与选择吸收的关键性器件,历来

受到重视, 目前正向集成光波导开关和全光开关方向发展. 在超高速全光开关与超快速光调制器方面, 目前重点研究多量子阱结构, 也有研究有机聚合物材料与生物芯片的. 作为下一代电子器件, 人们已经开始了基于超晶格微结构与纳米晶半导体的单电子器件.

在信息的存储方面, 与磁存储相比, 光存储具有存储密度高、存储寿命长、信息位价格低等优点, 它是信息领域中的重大科学技术前沿之一, 其中光盘存储已成为光电子产业的主要支柱. 信息技术的飞速发展, 对海量信息存储的需求迅猛增长, 而光存储目前达到的存储密度和数据传输速率还远远满足不了飞速发展的信息技术的要求. 于是, 高密度和快读写的光存储技术, 成为非常重要和极其迫切的课题. 达到或超过光的衍射极限(达到纳米量级)的超高密度存储技术和超大容量(海量)三维体存储技术, 是当前信息存储领域的一个热点, 而超短脉冲激光与纳米微区材料相互作用的机理的研究和对快速存取机制的探索将不仅在材料、存储机理和技术等方面为海量光存储的发展提供科学基础, 而且还将对材料科学、现代光学、信息工程学、微光机电工程学的研究产生深远影响.

我国早在 1991 年就启动了“八五”攀登计划项目——“飞秒激光技术与超快过程研究”, 比日本早 4 年, 体现了国家在这一重要科技领域急起直追的战略部署和科技主管部门的远见卓识. 我们自开展“飞秒激光技术与超快过程研究”以来, 在飞秒激光技术与超快速测量技术方面取得了许多重要成果. 在超快过程方面, 我们开始了许多重要研究, 取得了长足的进步. “九五”期间, 这一研究中的一些内容在攀登计划预选项目“强场激光物理与飞秒超快过程研究”中得到了延续.

3 结语

以上只是高速摄影和超短脉冲激光及其在应用方面的进展的极概括的介绍. 基于超短脉冲激光的信息的超快速获取是一种超快科学技术, 是当前信息科学的前沿, 具有强烈的渗透性和带动性. 今天, 由于化学、生物、材料等学科的研究已深入到纳米、分子和原子尺度, 在这个层次上, 绝大多数现象都是超快过程, 需要有超高时间、空间分辨能力的测试手段, 即信息的超快速获取手段, 才能研究, 因而超短脉冲激光技术的渗透性与带动性更加突出. 在 1995 年的 CLEO 会议上, AT⁸T 贝尔实验室的 Wayne H. Knox 在其大会特邀报告中称:“在今后世界上所有的研究工作及应用中, 超快科学与技术日益显得重要和不可或缺. 相对而言, 目前的超快技术发展速度还嫌太慢! 必需加快步伐大力发展!”. 1999 年度诺贝尔化学奖授予从事飞秒化学研究的美籍埃及人 A. H. Zewail, 这无疑将进一步刺激超快过程研究的发展和超短脉冲激光技术的进步. 希望本文能够引起有关方面的领导和科技人员对瞬态光学, 特别是超短脉冲激光技术与超快现象研究的重视. 中华民族的伟大复兴只有靠国人自己重视基础研究、重视创新, 通过长期持续不断的努力才能实现. 愿我国的瞬态光学及其应用能够在今后有迅速的长足的进步, 为中华民族的伟大复兴做出应有的贡献.

参考文献:

- [1] Alexander Dubovik The photographic Recording of High-Speed Processes Wiley—Interscience [Z]. 1981(Translated from the Russian).
- [2] 侯洵. 第十一章 变像管高速摄影 [A]. 龚祖同. 高速摄影 [M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1985.
- [3] 徐大伦. 变相管高速摄影 [M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [4] 牛憨笨, 宋宗贤, 任永安, 等. 一种通用快门变像管 [J]. 光机技术, 1979, (1): 16—37.
- [5] HADLAND PHOTONICS 公司产品样本 [Z].
- [6] 山冰, 常增虎, 刘进元, 等. 四通道 X 射线 MCP 行波选通分幅相机 [J]. 光子学报, 1997, 26(5): 450.
- [7] Hou Xun. Development of high speed photography and photonics at Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics [A]. 18th International Congress on High Speed Photography and Photonics [C]. SPIE, 1988, (1032): 252.
- [8] 植村恒义. 观察瞬态 [M]. 日本: 岩波书店, 1982.
- [9] Goodberlet J, Wang J, Fujimoto J G, et al. Starting dynamics of additive—pulse mode locking in the Ti:Al₂O₃ laser [J]. Opt. Lett., 1990, 15(22): 1300.
- [10] Stingl A, Lenzner M, Spielmann Ch, et al. Sub—10—fs mirror—dispersion—controlled Yt:sapphire laser [J]. Opt. Lett., 1995, 20(6): 602.
- [11] Xu L, Spielmann Ch, Krausz F, et al. Ultrabroad—band ring oscillator for short pulse generation [A]. 1996 Technical Digest Series, Vol. 8, Ultrafast Phenomena [C]. Optical Society of America, 1996, 2.

- [12] Wei Zh, Baltuska A, et al. 5-fs pulses at 1 MHz repetition rate are now available [J]. Opt-Letters, 1997, 22(2): 102.
- [13] Chen Z, Tempea G, Brabec T, et al. Generation of intense diffraction-limited white light and 4fs pulses [A]. Ultrafast Phenomena XI, Proceedings of the 11th International Conference [C]. Springer, 1998. 8.
- [14] Drescher M, Hentschel M, Kienberger R, et al. X-ray pulses approaching the attosecond frontier [J]. Science, 2001, 291 (Issue 5510): 1923-1927.
- [15] Hentschel M, et al. Attosecond Metrology [J]. Nature, 2001, 414: 509.
- [16] Keller U. Advances in all-solid-state ultrafast lasers [A]. 1996 Technical Digest Series, Vol. 8, Ultrafast Phenomena [C]. Optical Society of America, 1996. 4.
- [17] Erich P Ippen, David J Jones, Lynn E Nelson, et al. Ultrafast fiber lasers [A]. Ultrafast Phenomena XI, Proceedings of the 11th International Conference [C]. Springer, 1998. 30.
- [18] Koichi Yamakawa, Makoto Aoyama, et al. Generation of 100TW, sub-20fs pulses at a 10Hz repetition rate in Ti:sapphire [A]. Ultrafast Phenomena XI, Proceedings of the 11th International Conference [C]. Springer, 1998. 44.
- [19] 1996 Technical Digest Series, Vol. 8, Ultrafast Phenomena [C]. Optical Society of America, 1996.
- [20] Elsaesser T, Fjimoto G J, Wiersma D A, et al. Ultrafast Phenomena XI, Proceedings of the 11th International Conference [C]. Springer, 1998.
- [21] Juhasz T, Loesel F H, Horvath C, et al. Femtosecond laser for Ultra-accurate surgery: application to corneal surgery [A]. Ultrafast Phenomena XI, Proceedings of the 11th International Conference [C]. Springer, 1998. 687.