

飞秒激光技术

王水才

(中国科学院西安光机所)

本文简要概述了迅速发展的飞秒 (10^{-15} s) 激光技术, 其中包括飞秒光脉冲的产生、压缩放大、测量和应用。

一、飞秒激光脉冲产生

1981年美国贝尔实验室Fork等人用一台连续波(CW) Ar⁺激光器泵浦对撞脉冲锁模(CPM)环型染料激光器获得90飞秒宽的光脉冲[1], 其装置见图1。1984年, Fujimoto等人用脉冲压缩技术将70多飞秒的光脉冲压缩到16飞秒[2], 同年Halbaut等人把110飞秒光脉冲压缩到12飞秒[3], 采用的压缩装置见图2。1985年王清月等人用介质膜等补偿获得30多飞秒的光脉冲, 其装置见图3。同年Valdmanis和Fork等人用六镜腔四棱镜补偿获得了27飞秒的光脉冲[4], 见图4。四块棱镜平衡自相位调制(SPM)和群速弥散(GVD), 饱和吸收和饱和增益。1986年, 陈国夫在英国圣安、德鲁斯大学用四棱镜补偿六镜腔CPM环型染料激光器, 经过仔细补偿色散效应获得19飞秒的光脉冲。这是目前世界上用激光器产生的最短光脉冲, 用压缩技术得到的最短光脉冲为8飞秒[5], 仅有四个光学周期。

目前, 在飞秒激光脉冲产生方面正在进行的工作是理论和实验研究, 深入研究产生飞秒光脉冲的机理, 研究啁啾补偿和孤子效应, 研究光克尔效应, 企图用压缩方法得到更短的光脉冲。还在应用棱镜进行色散补偿, 研究介质反射膜光脉冲的色散效应, 研究群速色散在脉

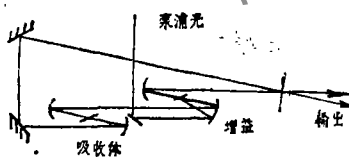


图1 对撞脉冲锁模环型激光器谐振腔

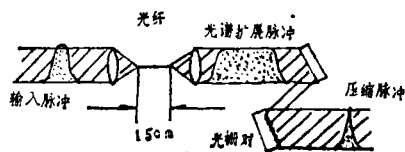


图2 光纤光栅对压缩光脉冲实验装置

冲压缩和行波激励上的应用。研究高稳定度的飞秒激光器, 笔者应用介质膜布氏棱镜补偿获得一种高稳定的飞秒激光器。另外有人在设计最佳啁啾补偿的CPM振荡器, 消除在产生小于50飞秒光脉冲时出现的多脉冲振荡现象, 研究寻求产生扩展波长的飞秒光脉冲激光器, 利用

收稿日期: 1987年4月30日。

CW锁模YAG激光器同步泵浦CPM染料激光器,图5是一种抗共振环CPM染料激光器[6],应用抗共振环作为线性腔的一端反射镜,两脉冲在可饱和吸收体中相撞,得到飞秒光脉冲输出。利用CW锁模YAG倍频激光器同步泵浦四镜腔染料激光器也能得到飞秒光脉冲[7]。Mourou等人采用图6装置得到了平均功率为30mW的70飞秒光脉冲。

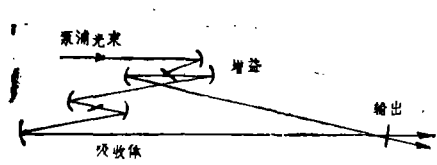


图3 六镜腔 CPM 环型激光器谐振腔

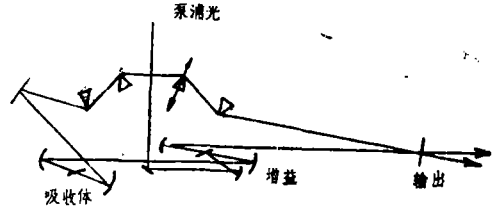


图4 六镜腔四棱镜补偿 CPM 环型激光器谐振腔

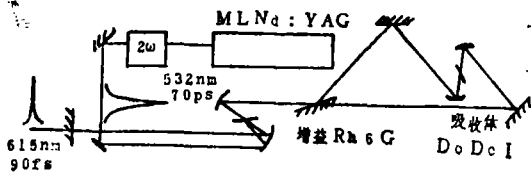


图5 抗共振环 CPM 染料激光器

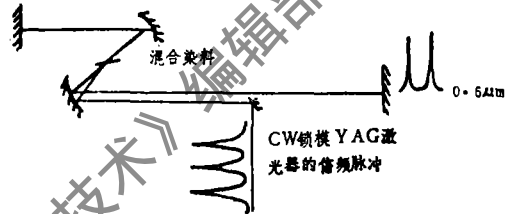


图6 倍频 CW 锁模 Nd:YAG 激光器泵浦四镜腔染料激光器

二、飞秒光脉冲压缩放大技术

目前最短的光脉冲是用光纤光栅压缩技术图2装置得到的。超短光脉冲进入光纤光栅压缩装置之前,先将脉冲放大,经过透镜,送入单模光纤中,脉冲光谱加宽,再经过透镜加到平面光栅上。光栅对使脉冲的每个波长分量以不同的角度衍射,遵循不同的光路,产生和波长有关的延迟。适当调整光栅的距离,就能得到适当的群速延迟,故使脉冲压缩。取单模光纤长15cm,可将90飞秒宽的光脉冲压缩到30飞秒。16飞秒脉冲是这样得到的,先将被压缩脉冲放大为5μJ能量的60飞秒光脉冲,经过聚焦滤波准直,利用一对600条/mm相隔2.5cm的用光栅对压缩器补偿,经透镜送入能够保持偏振的8mm光纤中,其输出再滤波准直,最后再用一对600条/mm相隔1.5cm的光栅压缩。8飞秒的光脉冲的压缩装置是由腔倒空CPM环型染料激光器输出27飞秒的光脉冲经铜蒸气激光泵浦放大,用10倍的物镜聚焦到芯径为40μm的7mm单模光纤中,其输出通过20倍物镜准直,再经过光栅对压缩器。

压缩装置前的激光放大器通常采用图7或图8中的一种。图7是一种飞秒光脉冲四级染料放大器系统,有 10^6 的放大倍数,可将脉冲放大到毫焦耳的能量级,放大器 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 分别用Nd:YAG激光器的输出经倍频后的 $0.53\mu\text{m}$ 光脉冲激励,其中 S_1 、 S_2 、 S_3 分别为可饱和吸收体,用以级间隔离。图8是一种飞秒光脉冲六次通过增益介质、两次通过可饱和吸收体的染料放大器,能连续放大5kHz的重复光脉冲,单次通过增益为5.5,能将90飞秒的光脉冲放大到1μJ的能量。目前飞秒光脉冲放大技术主要向高重复频率方向发展,已达3MHz。

另外减小放大器噪音, 尽量减小泵浦脉宽, 精确同步, 有利于光脉冲放大。

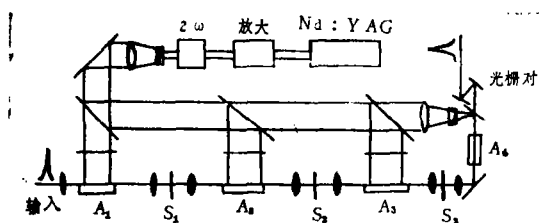


图7 飞秒光脉冲四级染料放大器[8]

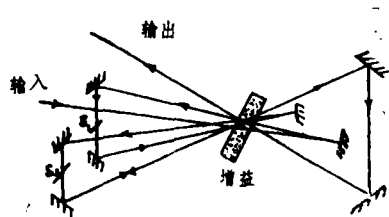


图8 用铜蒸气激光泵浦的六次通过增益两次通过可饱和吸收体的染料放大器[9]

三、飞秒激光脉冲测量技术

同皮秒(10^{-12} s)光脉冲测量相比, 必须考虑消除色散元件引起的飞秒脉冲加宽的问题。目前, 最快的条纹相机的时间分辨率为亚皮秒量级, 不能用来测量小于100飞秒的光脉冲, 测量飞秒光脉冲一般都采用二次谐波自相关法, 进行无背景非共线测量, 其装置见图9。应使二基波光束之间夹角尽可能的小, 聚焦成一个公共衍射极限的光斑, 使几何加宽达最小, 利用一块消色差透镜, 将光束聚焦到非线性晶体KDP上。一般非线性KDP厚 0.1mm 左右, 其取向是对激光器输出光波长的二次谐波相位匹配, 用能透过紫外光的胶将其固定在石英平板上, 晶体面向基波入射方向。二次谐波是用带有孔径光阑的紫外光电倍增管探测, 其输出由实时显示记录系统接收。如果要测量几个光周期的光脉冲, 强度相等的二光脉冲由步距为 $0.1\sim 0.01\mu\text{m}$ 的步进马达或者用极慢速的力矩马达产生相对延时, 使两个光脉冲的波前严格匹配。目前, 已测量短到8飞秒的光脉冲, 要测量更短的光脉冲还需要解决一些极大带宽的光学元件问题。目前, 有人在研究超低色散测量仪, 研究频率扫描超短光脉冲的相位测量[10], 用时域干涉术测量飞秒分辨率的光学相位。研究飞秒光脉冲实时测量系统, 研究飞秒超快速条纹相机和飞秒光脉冲成像[11], 利用超高速光电学器件研制激光辐射引起物质表面瞬态变化的“飞秒电影”。总之, 目前飞秒光脉冲测量技术的研究是非常活跃的领域。

四、飞秒激光技术前景

飞秒激光技术最终目的是利用飞秒光脉冲研究物质, 进行激光与物质相互作用。飞秒光脉冲的应用已经变成很活跃的领域, 飞秒光脉冲打开了全新现象发现和研究的的大门。目前, 已经形成飞秒光学这门最年轻的学科, 把飞秒激光技术的注意力已转向飞秒过程和应用研究。由于物质复杂的微观精细结构都表现为超高速瞬态光学现象, 只要光脉冲足够短, 就能把复杂的瞬态过程进行逐步分段观测, 反而使研究变得简单容易。像用10飞秒的光脉冲研究溶剂中分子的振动, 就能直接观测化学系统的能量交换。在飞秒光谱学方面, 正在进行相干时域远红外飞秒脉冲光谱学研究, 大功率可调谐光脉冲飞秒光谱学研究, 锗中的热载流子飞秒光谱学研究等等[12, 13, 14]。由于半导体中电子动量分布的弛豫和热电子的热化过程在20飞秒到200飞秒之间, 荧光出现的时间约为30飞秒, 因此不少人进行飞秒固体测量[15], 进行飞秒

时标荧光分析^[16], 用飞秒成像分析激光诱导表面熔化和蒸发、热电子迁移、半导体分子能

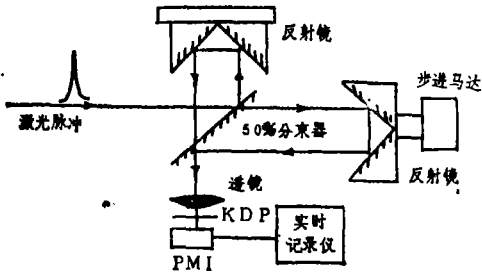


图9 二次谐波自相关仪

带弛豫的飞秒研究。在开展半导体材料研究方面,已经深入了一步,应用飞秒光脉冲研究超晶格量子阱结构的瞬态现象^[17],研究多量子阱结构的激子和有关电子与空穴对的飞秒动力学,研究半导体内的超快速荧光动力学的温度相关性等^[18,19,20]。在液体和气体方面,利用飞秒光脉冲研究液体和气体的微观动力学,飞秒多光子电离、用光克尔效应飞秒动力学测量液体的三阶电子极化率^[21,22],研究高有机分子飞秒弛豫动力学。在生物学和医学方面,飞秒激光技术也是一种强有力的研究工具,进行细菌光合作用的飞秒研究^[24],血红蛋白和血红素光解过程飞秒寿命物种的分辨,生物学系统的飞秒光学探测^[25]及飞秒蛋白质动力学和血红素反应研究等^[26]。可以预言,随着科学技术的发展,飞秒激光技术将深入到各个学科的尖端领域,将会有很多全新现象的发现,迫使人们必须修改某些物理、光学和化学定律,把尖端科学提高到一个更新的水平。

参 考 文 献

- [1] R.L.Fork, et al., Appl. Phys. Lett., 1981, Vol. 38, No. 9, P. 671.
- [2] J.G.Fujimoto, et al., Appl. Phys. Lett., 1984, Vol. 44, No. 9, P. 832.
- [3] J.M.Halbout, et al., Appl. Phys. Lett., 1984, Vol. 45, P. 1281.
- [4] J.A.Valdmanis, et al., Opt. Lett., 1985, Vol. 10, No. 3, P. 131.
- [5] W.H.Knox, et al., Appl. Phys. Lett., 1985, Vol. 46, P. 1120.
- [6] T.Norris, et al., J. Opt. Soc. Am. B, 1985, Vol. 2, No. 4, P. 613.
- [7] G.A.Mourou, et al., Opt. Comm., 1982, Vol. 41, No. 1, P. 47.
- [8] K.B.Eisenthal, et al., Picosecond Phenomena III, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 1982, P. 2.
- [9] W.H.Knox, et al., Opt. Lett., 1984, Vol. 9, No. 12, P. 552.
- [10] J.E.Rothenberg, et al., J. Opt. Soc. Am. B., 1985, Vol. 2, No. 4, P. 626.
- [11] D.H.Auston, et al., Ultrafast Phenomena IV, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York-Tokyo, 1984, P. 106.
- [12] D.H.Auton, et al., J. Opt. Soc. Am. A, 1984, Vol. 1, No. 12, P. 1278.
- [13] A.Migus, et al., J. Opt. Soc. Am. B, 1985, Vol. 2, No. 4, P. 584.
- [14] P.H.Pauchot, et al., Topical Meeting on Ultrafast Phenomena, June 16-19, 1986, Snowmass, Colorado, P. 139.
- [15] C.L.Tang, J. Opt. Soc. Am. A, 1984, Vol. 1, No. 12, P. 1273.
- [16] W.Rudolph, et al., Topical Meeting on Ultrafast Phenomena, June 16-19, 1986, Snowmass, Colorado, P. 281.

- [17] S. Tranaka, et al., J. Lumin, 1984, 31/32, Part, P. 400.
- [18] R. L. Fork, et al., J. Opt. Soc. Am. A, 1984, Vol. 1, No. 12, P. 1299.
- [19] P. P. Ho, et al., IEEE J. Q. E., 1986, QE-22, No. 1, P. 205.
- [20] G. R. Oibring, et al., Topical Meeting on Ultrafast Phenomena, June 16-19, 1986, Snowmass, Coiorado, P. 14.
- [21] J. Wies, et al., J. Opt. Soc. Am., 1983, Vol. 73, No. 12, P. 1883.
- [22] J. Etcheparc, et al., J. Opt. Soc. Am. B, 1985, Vol. 2, No. 4, P. 649.
- [23] H. J. Rosker, et al., Topical Meeting on Ultrafast Phenomena, June 16-19, 1986, Snowmass, Coiorado, P. 279.
- [24] W. Zinth, et al., Topical Meeitng on Ultrafast Phenomena, June 16-19, 1986, Snowmass, Coiorado, P. 187.
- [25] J. G. Fujimoto, et al., Opt. Lett., 1986, Vol. 11, No. 3, P. 150.
- [26] D. Houde, et al., Topical Meeting on Ultrafast Phenomena, June 16-19, 1986, Snowmass, Coiorado, P. 194.

Femtosecond laser technology

Wang Shuicai

(Xian Institute of Optics and Precision
Mechanics, Academia Sinica)

Abstract

Femtosecond laser technology including generation, compression, amplification and measurement of femtosecond light pulses and its applications are surveyed.

作者简介: 王水才, 男, 1937年1月出生, 副研究员。多年来从事快中子、微电子学、调Q和锁模激光器件、变象管皮秒相机、亚皮秒诊断技术等研究课题, 负责或参加研究的课题成果, 曾获得中科院科技进步奖、全国科技大会奖及国家科技进步奖。