

# 皮秒光脉冲在光纤中的传播特性测量

刘 天 夫

(中国计量学院信息工程系 杭州 310034)

胡 桂 林

(浙江大学热能工程研究所 杭州 310027)

**摘 要** 文章讨论了皮秒激光脉冲在单模光纤传输中光纤介质的色散及非线性折射率等效应对皮秒光信号的影响.利用时间相关单光子计数系统,观测了皮秒激光脉冲在单模光纤中的展宽及皮秒自聚焦现象,并对光纤中皮秒光脉冲的畸变进行了检测与研究.

**关键词** 皮秒光脉冲,光纤色散,皮秒自聚焦,时间相关单光子计数

## DETECTION OF THE TRANSMISSION CHARACTERISTICS OF PICOSECOND LASER PULSES IN FIBERS

LIU Tian-Fu

(Department of Information Engineering, China Institute of Metrology, Hangzhou 310034, China)

HU Gui-Lin

(Institute for the Power Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract** The influence of effects such as dispersion and nonlinear refractive index on picosecond laser pulse transmission in single-mode fiber is discussed. Picosecond auto-focus phenomena and the broadening of the pulses have been observed using time-correlated single-photon counting. The aberration of picosecond pulses in fiber has also been detected and studied.

**Key words** picosecond laser pulses, optical fiber dispersion, picosecond autofocus, time-correlated single-photon counting

### 1 引言

单模光纤直径小,具有较低的非线性阈值功率.通过观测功率可变的皮秒激光脉冲在单模光纤中的传输特性,研究高能量密度下光纤介质非线性对超短脉冲激光波形的影响,对光纤通信、光纤传感等应用都具有十分重要的意义.众所周知,除了光纤损耗,光纤色散是另一项极重要的指标.它是指不同波长的光在光纤中传播时,能量会发生分离现象,致使传输的光脉冲产生畸变或展宽.然而,光纤介质的非线性光学效应并不只是孤立的现象,它们经常是好几个效应同时出现.因此实验中,我们需要直接观测波形畸变的具体形状,并进行研究.但是,对于皮秒( $10^{-12}$  s)量级光脉冲形状的精确检测是很困难的,而且方法也十分有限<sup>[1]</sup>.为此,本文采用时间分辨率为皮秒( $10^{-12}$  s)量级的时间相关单光子计数检测系

统<sup>[2]</sup>,利用它直接观测皮秒激光脉冲在单模光纤传输过程中,因非线性折射率所引起的波形展宽及自聚集等畸变现象的精细结构,并对它进行了理论分析与研究.

### 2 实验方法及原理

实验中,采用直径为  $4.5\mu\text{m}$ 、损耗为  $0.35\text{dB/km}$  ( $1.06\mu\text{m}$  值)  $2\text{km}$  单模光纤,皮秒光信号源采用美国光谱物理公司 171 型主动锁模  $\text{Ar}^+$  激光器.光纤耦合效率优于  $35\%$ ,光纤出端采用皮秒量级分辨率的时间相关单光子计数系统(time-correlated single-photon counting method)进行检测,其装置如图 1 所示.它的主要特点是:该系统不但可以像普通光子计数器

\* 国家质量技术监督局科学基金(批准号 99-A01-06)资助项目  
2001-09-05 收到初稿 2001-11-16 修回

那样,允许长时间数字化积累以提高检测灵敏度.同时,还可以像取样积分器那样,方便地选择采样点数,精确地记录被测周期信号的波形.

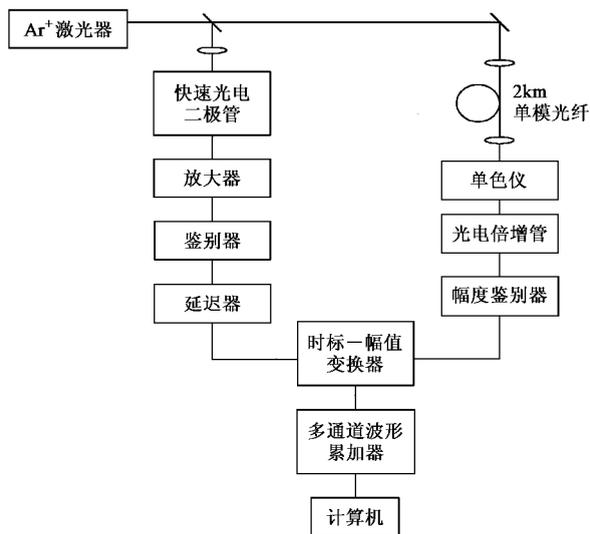


图1 测量光纤传输特性的实验装置图

时间相关单光子计数系统的工作原理是:对应被测周期信号的某一位相点所测到的单个光子,经检测系统的精确控制,对信号通道进行高度重复的计数积累,由计算机解析后,可以精确地再现被测光信号的波形.该系统主要由三部分组成:一是由高速光电二极管及延时电路产生用于控制时间波峰变换器(TAC)的时间基准电路系统.第二部分是连接光电倍增管的信号幅度量化鉴别电路系统,它能按照分区采样的时间顺序,将信号送入TAC进行处理.第三部分是将TAC的输出脉冲信号进行A/D变换,同时送入具有多通道存储、累加功能的多通道波形累加器(MCA)电路系统.最后,信号经由MCA输入到计算机进行解析,恢复被测信号的波形.

另一方面,为了保证检测系统的皮秒分辨率本领,除采用高速光电二极管产生同步信号外,主要是对光电倍增管的渡越时间特性有严格的要求<sup>[3]</sup>.为此,我们采用了日本滨松光电公司生产的R1564U型光电倍增管,它带有高工作电压微通道板(MCP)阳极结构,其光电子渡越时间为50ps<sup>[4]</sup>,从而保证了检测系统的皮秒分辨率.

### 3 测量结果与讨论

导致光纤介质非线性折射率变化的因素很多,也很复杂.在我们的实验中,通过改变皮秒光脉冲输入端耦合功率的大小,并利用时间相关单光子计数

检测系统,直接观测记录2km单模光纤输出端的光脉冲的波形及其光谱特性,来研究光纤非线性对皮秒光信号传输的影响.

由主动锁模Ar<sup>+</sup>激光器产生波长为514.5nm、脉宽为100ps、频率为82MHz的皮秒光信号.利用20倍显微眼镜及多维光学架调整光纤输入端的耦合功率的大小.实验发现,当输入功率逐渐增大时,输出光信号的脉冲也随之加宽.如图2(a)所示,当输入光功率为0.55W时,输出光信号的宽度已经比输入的100ps展宽了130ps.当输入功率增加到1.0W时,输出光信号的宽度已经达到370ps,如图2(b)所示.上

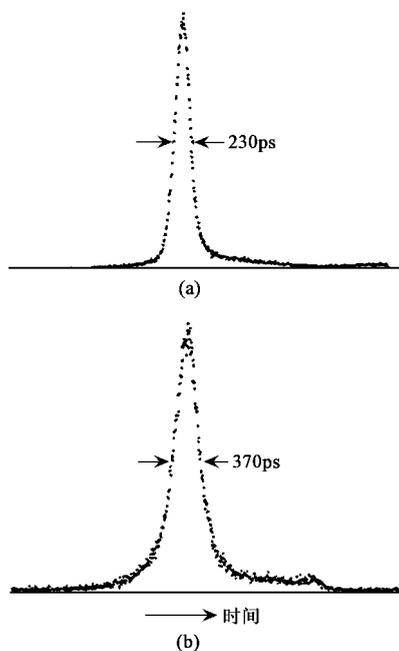


图2 不同耦合功率时2km单模光纤输出端的光信号波形  
(a)输入功率为0.55W时,输出光脉冲波形;  
(b)输入功率为1.0W时,输出光脉冲波形

述的展宽现象,其主要原因是由于光纤介质的群速度色散所致.由于光纤中传输的是皮秒( $10^{-12}$ s)激光脉冲,它具有一定的频谱宽度.单模光纤的芯径很小(微米量级),因此当加大光纤耦合功率时,会使光线介质的能量密度瞬间剧增,其结果将导致光纤介质折射率也产生相应的瞬态变化而使脉冲展宽.理论与实验均已证实,高能量密度激发下的光纤介质折射率的变化,是超短激光脉冲能量包络所决定的时间函数.实际上,因激光脉冲前后沿所引起的折射率的变化也是不相同的,因光纤介质的色散效应,也将导致光脉冲不同部位的传播速度也不相同,这种现象也称为啁啾.脉冲宽度越窄,啁啾导致波形的变

化也越明显.因此,随着光纤耦合功率的增大,必将导致光脉冲的展宽也随之增大,这与我们图 2(a), (b) 的实验结果相一致.

然而,当输入端的功率继续增加到 1.2W 时, 2km 光纤的输出端光脉冲信号出现了光波能量的分裂现象,形成了振荡的多重光束,如图 3 所示.对于图 3 出现的振荡现象,我们认为其主要原因是由于光纤介质的皮秒光脉冲的自聚焦效应所致.光纤自

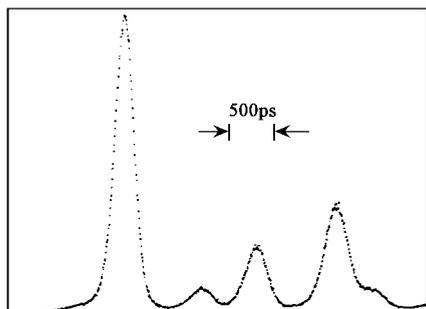


图 3 输入功率增加到 1.2W 时, 2km 单模光纤输出端的光脉冲信号

聚焦现象的产生,一般认为如果激光为高斯光束,则对应于光束中心位置的介质折射率将大于光束边缘位置的折射率,因而使光纤介质等效于凸透镜的作用所致<sup>[6]</sup>.但是,我们认为图 3 所得到的实验结果,是一种基于皮秒持续时间的自聚焦的特殊现象,产生的原因是:由于光纤介质在皮秒量级的高能量密度激发状态下,光纤非线性折射率的弛豫时间比光脉冲持续时间要长得多,从而导致折射率的变化达不到稳定状态.也就是说,由于光纤非线性折射率的瞬态变化跟不上皮秒信号脉冲前、后沿的上升和下

降,导致信号光脉冲的后沿遇到的折射率可能比前沿更大,因此形成皮秒自聚焦的积累过程,使光波能量分裂,形成多重光斑.实验测得,其光斑直径  $\phi$  大约在 0.5—1.5 $\mu\text{m}$  不等.而利用时间相关光子计数系统测得输出端信号的光子飞行时间分布如图 3 所示,形成具有皮秒持续时间的自聚焦特征的信号波形畸变.

## 4 结语

利用皮秒分辨率时间相关单光子计数系统,能够准确、方便地观测单模光纤由于非线性折射率而引起的皮秒光脉冲信号的波形畸变.这种直接观测方法对于光纤通信、光纤传感等应用具有十分重要的意义.利用该测量系统,我们首次观测到单模光纤因非线性折射率引起的皮秒自聚焦动力学振荡的变化图像.讨论了因脉冲光强随时间变化导致的光纤介质折射率变化所引起的光脉冲波形的展宽等现象.分析了高能量密度下,介质的皮秒自聚焦现象的空间特征及其成因.

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 刘天夫.物理,1990,19:357 [ Liu T F. WuLi(Physics),1990,19:357(in Chinese) ]
- [ 2 ] Liu T F *et al.* Rev. Laser Eng., 1996, 22: 581
- [ 3 ] Aspin G J *et al.* IEEE proc. Part I, 1982, 129: 283
- [ 4 ] Kinoshita S *et al.* Cytometry, 1987, 8: 35
- [ 5 ] Mecozzi A *et al.* IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12: 392
- [ 6 ] Koumans R G M P *et al.* IEEE J. of Quantum Electronics, 2000, 36: 137

## 封 面 说 明

在衬底表面上周期排列的全同金属纳米点或原子簇是一种新的二维人造晶格,它们在下一代微电子技术、高密度信息储存、纳米催化和光化学反应等方面具有重要的应用前景.生长尺寸在 1—2nm 的原子簇组成的人造二维晶格需要原子水平上的精确控制,这为利用宏观分析手段研究个别原子簇的性质奠定了基础.最近我们已经成功地用外延方法第一次实现了这种二维人造晶格.封面上显示的是在 Si(111)-7 $\times$ 7 表面生长的金属铝全同纳米原子簇的二维人造晶格的扫描隧道显微镜照片.图中每个三角形亮点代表一个铝的纳米原子簇,它们排列成有序的蜂窝结构,蜂窝孔间距为 2.7nm.左上图片放大倍数约 250 万倍,右下图放大倍数为 700 万倍,雪花状插图为原子分辨的图像.

(中国科学院物理研究所 贾金峰 薛其坤)