

# 高功率紫外纳秒激光脉冲的光纤取样传输特性研究

唐 清<sup>1,2</sup> 杨 琳<sup>1</sup> 郭亚晶<sup>1,2</sup> 欧阳小平<sup>1</sup> 唐顺兴<sup>1</sup> 朱宝强<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 在神光 II 系列装置中,为降低成本和减少示波器、快响应光电管等设备的使用,采用紫外光纤对高功率紫外纳秒激光脉冲进行取样并束测量。对高功率紫外纳秒激光脉冲在光纤中的传输特性和保真传输条件进行了理论分析和模拟研究,并据此选取了不同芯径的阶跃型紫外多模光纤进行实验研究。结果表明,对于芯径为 25  $\mu\text{m}$  的光纤,传输纳秒量级的紫外激光脉冲时畸变小,能进行较长距离传输,可以作为紫外激光脉冲的取样传输介质。利用芯径为 25  $\mu\text{m}$  的光纤演示了光纤取样传输并束测量实验方案,验证了光纤并束测量的可行性。研究结果为神光 II 高功率紫外激光脉冲时间波形的光纤并束测量提供了理论和实验依据。

**关键词** 激光光学; 光纤并束测量; 光纤取样传输; 紫外纳秒激光脉冲; 传输特性

**中图分类号** O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.0905006

## Research of Sampling and Propagating Characteristics of High Power Ultraviolet Nanosecond Laser Pulse

Tang Qing<sup>1,2</sup> Yang Lin<sup>1</sup> Guo Yajing<sup>1,2</sup> Ouyang Xiaoping<sup>1</sup>  
Tang Shunxing<sup>1</sup> Zhu Baoqiang<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In order to lower the costs, and reduce the use of devices such as oscilloscope and fast response photodiode in SG II, the ultraviolet optical fiber is used to sample and integrate measurement for the high power ultraviolet nanosecond laser pulse. Through the theoretical analysis and simulation study of the propagate characteristics and the condition of distortionless propagation of the high power ultraviolet nanosecond laser pulse in the optical fiber, different core diameter fibers are chosen to carry on the experimental research. It shows that the distortion is low when the high power ultraviolet nanosecond laser pulse propagates in the 25  $\mu\text{m}$  core diameter fiber. The 25  $\mu\text{m}$  core diameter optical fiber is suitable for long distance propagation and is a preferable medium for fiber sampling and propagating. A demonstrative experiment is taken to prove the feasibility of integrate measurement. These results provide theoretical and experimental basis for the high power laser pulse integration measurement of SG II.

**Key words** laser optics; optical integrated measurement; fiber sampling and propagating; ultraviolet nanosecond laser pulse; propagate characteristics

**OCIS codes** 060.2270; 060.2300; 060.4370; 060.5530

## 1 引 言

神光 II 系列装置共有 9 路激光,每路激光经过倍频与和频后产生高功率的三倍频紫外激光脉冲<sup>[1]</sup>,紫外激光脉冲的时间波形是衡量神光 II 系列

装置的性能和相关物理实验的重要参量。目前对高功率紫外激光脉冲时间波形的测量采用的是一个光电探测器结合一个示波器通道对应一个测量点的方法。随着物理实验的需要和神光 II 系列装置的不断

**收稿日期:** 2013-03-13; **收到修改稿日期:** 2013-05-14

**作者简介:** 唐 清(1986—),男,硕士研究生,主要从事激光参数测量方面的研究。E-mail: tangqing256@163.com

**导师简介:** 杨 琳(1978—),女,硕士,副研究员,主要从事高功率激光参数测量控制方面的研究。

E-mail: axiulowt@hotmail.com(通信联系人)

改进,需要测量的激光束数量会不断增长,这种方法所需要的光电探测器和示波器也会相应增多,因而会增加测量系统的成本和复杂性,降低可靠性,不利于测量系统的维护。

由于光纤具有易弯曲、可集成、传输距离长和抗干扰能力强等优点<sup>[2]</sup>,因此,提出了利用紫外光纤取样和时分复用的方法并束测量紫外激光脉冲的时间波形,这样就可以减少光电探测器和示波器的数量,降低成本,提高测量系统的集成度,同时还能提高系统的抗干扰能力。但是由于紫外激光脉冲在光纤中传输时损耗大,高功率紫外激光的能量大容易产生非线性效应<sup>[3]</sup>、损伤光纤端面<sup>[4]</sup>,以及光纤色散等因素的影响,紫外光纤的传输能力可能有限<sup>[5-7]</sup>。为此,本文通过理论分析、模拟研究和实验验证的方法,研究了利用紫外多模光纤取样传输方法测量高功率紫外激光脉冲时间波形的可行性。

## 2 理论分析

市场上目前有多种紫外特种光纤,如模场直径为 2.0~2.4 μm,数值孔径 NA=0.12~0.14 的单模紫外光纤;数值孔径 NA=0.22,芯径为 100 μm 的阶跃型紫外多模光纤;数值孔径 NA=0.22,芯径为 50 μm 的阶跃型紫外多模光纤;芯径为 25 μm 和 10 μm 的阶跃型紫外多模光纤,数值孔径 NA=0.10,纤芯折射率  $n_1=1.4570$ ,包层折射率  $n_c=1.4537$ 。市场上目前没有渐变折射率的多模紫外光纤。

### 2.1 色散效应分析

在光纤中传输的激光脉冲会受到光纤色散的影响,光纤中的色散主要有材料色散、波导色散和模式色散<sup>[8]</sup>。材料色散为

$$\tau_n = -L \frac{\lambda_0}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \Delta_\lambda, \quad (1)$$

式中  $\lambda_0$  为光源的中心波长,  $\Delta_\lambda$  表示光源的谱线宽度,  $c$  为真空中的光速,  $L$  为光纤的长度。材料色散取决于折射率  $n$  对波长  $\lambda$  的二阶导数  $\frac{d^2 n}{d\lambda^2}$ 。在 351 nm 处,

$\frac{d^2 n}{d\lambda^2}=1.5545 \mu\text{m}^{-2}$ ,由于激光器的线宽可以小于 1 nm,因此纳秒量级激光脉冲的材料色散可以忽略。

波导色散是由于光纤波导各区域的折射率不同引起的,波导色散为

$$\tau_w = -\frac{n\Delta_n V}{c\lambda_0} \frac{d^2(Vb)}{dV^2} \Delta_\lambda, \quad (2)$$

式中  $\frac{d^2(Vb)}{dV^2}$  称为波导色散因子,  $V$  为归一化频率,  $b$

是 LP<sub>01</sub> 模的场归一化传播常数,  $\Delta_n$  是相对折射率差。对于实际光纤  $V=2.0 \sim 2.4$ ,  $\frac{d^2(Vb)}{dV^2}$  仅为 0.1~0.2,若  $\Delta_n=0.005$ ,  $n=1.5$ ,则波导色散  $\tau_w \approx -0.0015 c^{-1} \Delta_n / \lambda$ ,这个值是很小的,因此,在多模光纤中,波导色散可以完全忽略不计<sup>[9]</sup>。

阶跃型多模光纤中最主要的色散是模式色散,其最大时延差为

$$\tau_m = \frac{Ln_1^2}{c \sqrt{n_1^2 - \sin^2 \theta_c}} - \frac{Ln_1}{c} = \frac{Ln_1 \Delta_n}{c}, \quad (3)$$

等式右边第一项是沿光纤端面以临界角  $\theta_c$  入射的光线传播所用的时间,第二项是沿光纤轴线传播的模式所用的时间,  $n$  为纤芯折射率。

由(3)式可以简单估算出经过 50 m 长的阶跃型多模光纤传输,模式色散可以达 1 ns。因此,模式色散是限制激光脉冲在多模光纤中远距离传输的重要因素。

### 2.2 光纤非线性效应分析

由于待测量的紫外激光脉冲功率高,而且其功率会有一定的波动。因此,在进行光纤取样传输时,耦合进入光纤的光功率可能会很高。同时,因为紫外光纤的损耗很大,所以在一定程度上需要有较多的光功率进入光纤,但是当光纤中传输的光能量很高时,光纤中可能产生非线性效应,带来损耗、噪声和脉冲展宽等不利影响<sup>[10]</sup>。因此,在取样时必须控制好光纤中传输的光功率。当光纤中的光功率较高时,对激光脉冲影响很大的非线性效应主要有两种:受激拉曼散射和受激布里渊散射。

当注入光纤的光功率超过某一阈值时,在光纤中就会产生受激拉曼散射<sup>[11]</sup>。产生受激拉曼散射的阈值抽运功率有表达式:

$$\frac{g_R (P_{\text{SRS}})_{\text{th}} L_{\text{eff}}}{A_{\text{eff}}} \approx 16, \quad (4)$$

式中  $(P_{\text{SRS}})_{\text{th}}$  为阈值抽运功率;  $g_R$  为拉曼增益系数;  $L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha_p L)] / \alpha_p$  为有效光纤长度,其中  $L$  为光纤的实际长度,  $\alpha_p$  为抽运光在光纤中的损耗系数;  $A_{\text{eff}}$  为光纤的有效光斑面积。在大芯径的多模光纤中,受激拉曼散射的阈值一般在千瓦量级,但是在芯径较小的多模光纤或者单模光纤中,受激拉曼散射的阈值可以很小。由于神光 II 装置的输出功率非常高,因此在光纤取样时,取样功率可能超过光纤的非线性阈值功率而造成非线性效应。

若抽运光是连续的或脉宽较大的光(大于 1 μs),受激布里渊散射的阈值功率可以很小。若脉

冲的宽度小于 10 ns ,受激布里渊散射很难产生。

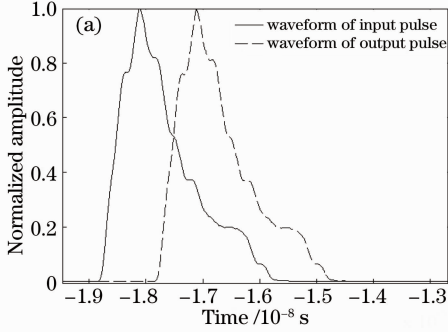
### 3 激光脉冲在光纤中的传输特性模拟

#### 3.1 单模光纤中激光脉冲的传输特性

激光脉冲在单模光纤中的传输特性可以通过求解非线性薛定谔方程得到,激光脉冲在单模光纤中的传输方程为<sup>[12]</sup>

$$\frac{\partial A}{\partial Z} + \frac{\alpha}{2}A + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} = i\gamma \left[ |A|^2 A + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial(|A|^2 A)}{\partial T} \right], \quad (5)$$

式中  $A$  为激光脉冲幅度,  $Z$  表示激光脉冲沿  $Z$  轴传输的



距离,  $T$  表示激光脉冲沿  $Z$  轴传输的时间,  $\omega_0$  表示激光脉冲的中心频率,  $\alpha$  表示光纤的损耗系数,  $\beta_2$  表示二阶色散,  $\beta_3$  表示三阶色散,  $i\gamma \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial(|A|^2 A)}{\partial T}$  是自陡峭项,  $i\gamma |A|^2 A$  是自相位调制项。(5) 式中没有考虑拉曼散射等高阶非线性效应项。  $\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{\text{eff}}}$  是非线性参量,  $\beta_2 = \frac{\lambda_0^3}{2\pi c^2} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \Big|_{\lambda=\lambda_0}$ ,  $\beta_3 = \frac{\lambda_0^4}{4\pi^2 c^3} \left( 3 \frac{d^2 n}{d\lambda^2} + \lambda \frac{d^3 n}{d\lambda^3} \right) \Big|_{\lambda=\lambda_0}$ , 石英晶体的非线性折射率系数  $n_2 = 3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ , 取  $\lambda_0 = 351 \text{ nm}$ , 利用进入光纤之前的波形作为输入进行模拟, 得到图 1 所示的模拟结果。

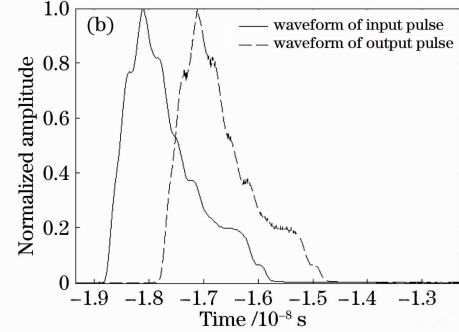


图 1 单模光纤的模拟结果。(a) 功率为 5 W; (b) 功率为 150 W

Fig. 1 Simulated results of single mode fiber. (a) 5 W power; (b) 150 W power

由(4)式可以计算出 50 m 单模光纤中产生高阶非线性效应的阈值功率是 5 W 左右, 首先用 5 W 的功率进行模拟, 图 1 为了对比, 将两个脉冲作了平移。从图 1 中(a)可以看出, 5 W 功率的激光脉冲经过 50 m 长的光纤传输后, 激光脉冲的波形并未受到影响, 脉冲没有展宽, 说明单模光纤在 351 nm 处色散很小, 非线性效应的影响也几乎没有。当光功率提高到 150 W 时, 脉冲的细节上出现了很多小毛刺, 这是低阶非线性效应产生的, 若进一步考虑功率大于 5 W 时, 光纤中会产生受激拉曼散射等高阶非线性效应, 拉曼光叠加在原来的的脉冲上, 会使原始脉冲产生严重畸变。由于 351 nm 处光纤的损耗大, 5 W 的光功率经过光纤传输后光功率已经很小, 但是当光纤中的光功率大于 5 W 时, 高阶非线性效应又会不可避免地产生。因此, 用单模光纤传输高功率紫外纳秒激光脉冲会受到最大传输功率的限制。

#### 3.2 多模光纤中激光脉冲的传输特性

在多模光纤中存在许多模式, 每个模式有自己的模场分布和传播常数, 由此造成多模光纤中有较大的模式色散。为了选出合适芯径的多模光纤, 下面将利用多模光纤的脉冲响应函数分析在阶跃型多

模光纤中脉冲的传输特性。

当激光脉冲从光纤头 ( $z=0$ ) 处注入光纤时, 阶跃型多模光纤中的脉冲响应函数为<sup>[13]</sup>

$$h(z, t) = \sum_{\mu} \omega_{\mu} \exp(-\gamma_{\mu} z) \delta(t - \tau_{\mu} z), \quad (6)$$

式中  $\omega_{\mu}$  是第  $\mu$  个模式的功率分配系数,  $\gamma_{\mu}$  是第  $\mu$  个模式的损耗系数,  $\tau_{\mu}$  是每单位长度上的模式群时延。对(6)式作一定的简化, 假设每个模式的功率分配系数和损耗系数相等, (6)式可以简化为

$$h(z, t) = \sum_{\mu} \omega \exp(-\gamma z) \delta(t - \tau_{\mu} z), \quad (7)$$

由(7)式与输入脉冲卷积得到的结果如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 经过芯径为 100  $\mu\text{m}$  和 50  $\mu\text{m}$  的光纤传输后, 激光脉冲波形严重展宽, 而经过芯径为 25  $\mu\text{m}$  和 10  $\mu\text{m}$  的光纤传输后, 脉冲展宽约 10%, 这是因为小芯径的光纤数值孔径小, 光纤中模式数少, 不同模式之间的时延差小, 所以脉冲展宽小。由(7)式模拟的计算结果值是偏大的, 因为在多模光纤中, 每个模式的功率分配系数不同, 衰减也不相同, 低阶模的衰减要大, 同时由于光纤弯曲等因素的影响, 在传输过程中有较多的模式会被衰减掉, 还有一部分低阶模会耦合到高阶模中。因此, 实际的脉冲展宽量会比图 2 的结果小。

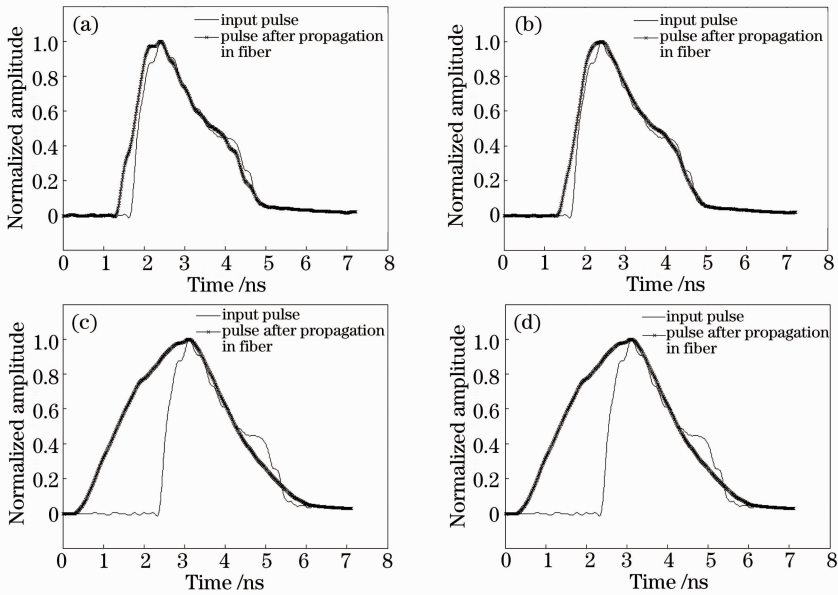


图 2 阶跃型多模光纤的模拟结果。芯径分别为(a) 10  $\mu\text{m}$ ; (b) 25  $\mu\text{m}$ ; (c) 50  $\mu\text{m}$ ; (d) 100  $\mu\text{m}$   
 Fig. 2 Simulated results of step index multi-mode fiber. Core diameters are (a) 10  $\mu\text{m}$ ; (b) 25  $\mu\text{m}$ ; (c) 50  $\mu\text{m}$ ; (d) 100  $\mu\text{m}$ , respectively

### 4 实验研究

根据理论分析和模拟的结果,单模光纤耦合困难,功率承受能力有限,容易产生非线性效应,所以采用多模光纤进行验证实验,综合考虑耦合效率、非线性效应及色散的影响,选取了芯径为 100  $\mu\text{m}$  和 25  $\mu\text{m}$  的光纤进行实验验证。

#### 4.1 光路图及实验原理

实验光路如图 3 所示,激光器输出基频 (1053 nm) 脉冲光,频率为 1 Hz,能量为 3 mJ,脉宽

为 3 ns。基频激光脉冲经倍频以及和频晶体后得到三倍频光 (351 nm),完全滤除基频和二倍频光 (527 nm)后,将三倍频紫外激光脉冲分光,一束光经衰减后直接进入快响应光电管,另一束光经衰减后耦合进入光纤,经过一定长度的光纤传输后进入快响应光电管。实验中采用了高速数字示波器与快速响应光电探测器相结合的方法测量激光脉冲的时间波形。采用激光脉冲在空气中传输与在光纤中传输进行对比的方法,分析脉冲的畸变情况。

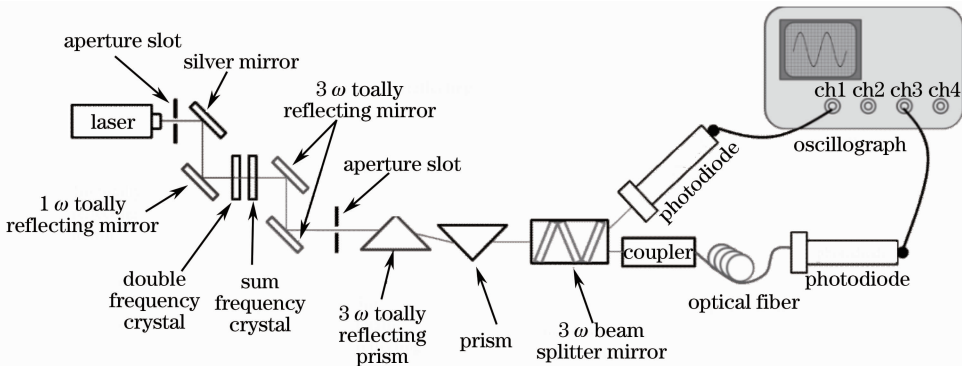


图 3 实验光路图  
 Fig. 3 Schematic diagram of experiment

#### 4.2 实验结果

测试了不同长度不同芯径的紫外光纤对紫外激

光脉冲的传输特性,测试结果如表 1 和表 2 所示。

表1 脉宽的测量结果

Table 1 Measurement results of pulse width

Fiber length (100 $\mu\text{m}$ core diameter) /m	Pulse width of air path /ns	Pulse width of fiber path /ns	Relative error /%	Fiber length (25 $\mu\text{m}$ core diameter) /m	Pulse width of air path /ns	Pulse width of fiber path /ns	Relative error /%
5	3.02	2.99	0.99	6	3.03	3.00	0.99
10	3.01	3.01	0	11	3.02	3.00	0.66
15	3.02	3.04	0.66	16	3.03	3.00	0.99
20	3.01	3.09	2.66	21	3.06	3.00	1.96
25	3.00	3.18	6.00	26	3.05	3.01	1.31
30	3.04	3.13	2.96	31	3.04	3.00	1.32
35	3.04	3.12	2.63	36	3.04	3.01	0.99
				41	3.04	3.01	0.99
				46	3.05	3.02	0.98

表2 上升时间的测量结果

Table 2 Measurement results of rise time

Fiber length (100 $\mu\text{m}$ core diameter) /m	Rise time of air path /ps	Rise time of fiber path /ps	Relative error /%	Fiber length (25 $\mu\text{m}$ core diameter) /m	Rise time of air path /ps	Rise time of fiber path /ps	Relative error /%
5	533	537	0.75	6	507	491	3.16
10	464	466	0.43	11	478	453	5.23
15	429	467	8.86	16	487	455	6.57
20	430	543	26.28	21	502	524	4.38
25	410	587	43.17	26	518	498	3.86
30	425	558	31.29	31	501	499	0.40
35	458	604	31.88	36	507	480	5.33
				41	501	479	4.39
				46	494	513	3.85

从表1可以看出,光纤较长时,紫外纳秒激光脉冲经过芯径为100  $\mu\text{m}$  光纤传输后展宽较大,脉宽的畸变误差也较大;而激光脉冲在芯径为25  $\mu\text{m}$  光纤中经过约50 m传输后,激光脉冲的宽度变化很小,相对误差基本小于2%,这个误差在测量允许的范围内。从表2可以看出,当光纤较短时,经过芯径为100  $\mu\text{m}$  的光纤传输,激光脉冲上升时间的误差很小,但是当光纤较长时,上升时间的误差超过10%,脉冲发生严重的畸变;芯径为25  $\mu\text{m}$  的光纤在传输激光脉冲时,上升时间的误差基本小于5%,畸变的误差在测量允许的范围内。

### 4.3 波形对比

对于芯径为100  $\mu\text{m}$  的光纤,从图4可以看出,光纤较短时,经过光纤传输的激光脉冲并没有发生较大的展宽或者畸变,脉冲波形的细节与在空气中传输的脉冲波形基本一致,但是当光纤较长时,如图4(b)所示,经过25 m长的光纤传输后激光脉冲的前沿开始变缓,波形上一些变化较快的细节也被抹平,这是色散导致的,对于较长的光纤,在脉冲较陡

的前沿,这种色散导致的展宽将变得比较明显,所以经过芯径为100  $\mu\text{m}$  的光纤传输后,激光脉冲的上升时间变长,误差增大。同时色散造成波形局部细节被展宽,使得波形变得平滑。这说明芯径为100  $\mu\text{m}$  的阶跃型多模光纤的脉冲传输能力有限。

对于芯径为25  $\mu\text{m}$  的光纤,其数值孔径NA较小,  $V = \frac{2\pi a NA}{\lambda} = 22.38$ ,模式数大约为  $N = \frac{V^2}{2} = 250$ ,并且由于损耗和光纤中模式耦合的影响,在光纤中传输的实际模式数要比理论计算的少很多,所以芯径为25  $\mu\text{m}$  的光纤色散作用小,脉冲的畸变小。经过约50 m长的光纤传输,脉冲波形的细节保持得比较好,仅在脉冲的尾部,由于光纤损耗使功率降低,尾部在光电管中的响应低,与经过空气传输的波形产生了一点误差,如图4(c)、(d)所示。但是经过芯径为25  $\mu\text{m}$  的光纤传输后,输出脉冲波形的整体误差小,在测量允许的范围内。实验结果说明,芯径为25  $\mu\text{m}$  的阶跃型多模光纤可以用于高功率紫外纳秒激光脉冲时间波形的取样传输测量。

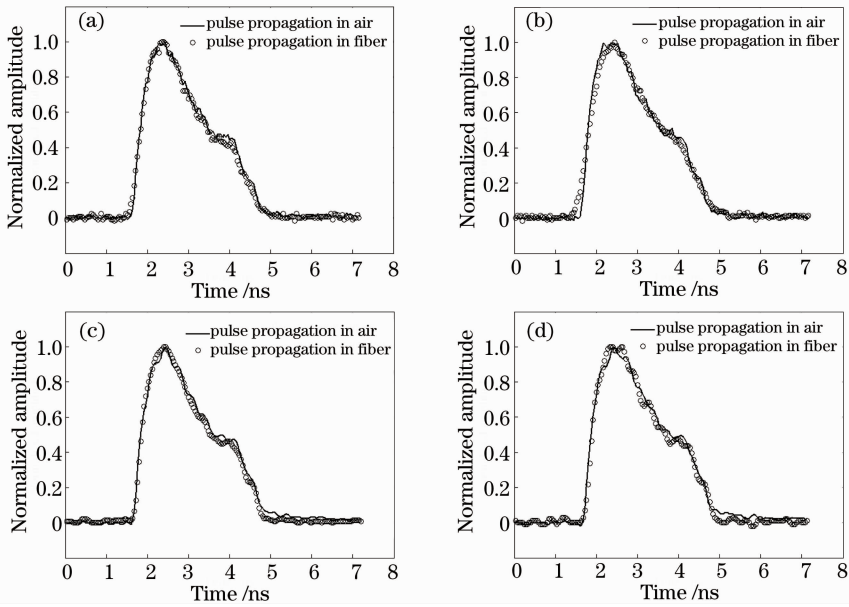


图 4 波形对比图。(a) 芯径为 100  $\mu\text{m}$ , 光纤长为 15 m; (b) 芯径为 100  $\mu\text{m}$ , 光纤长为 25 m; (c) 芯径为 25  $\mu\text{m}$ , 光纤长为 41 m; (d) 芯径为 25  $\mu\text{m}$ , 光纤长为 46 m

Fig. 4 Comparison of waveforms. (a) Core diameter is 100  $\mu\text{m}$ , fiber length is 15 m; (b) core diameter is 100  $\mu\text{m}$ , fiber length is 25 m; (c) core diameter is 25  $\mu\text{m}$ , fiber length is 41 m; (d) core diameter is 25  $\mu\text{m}$ , fiber length is 46 m

#### 4.4 多模光纤中的非线性效应

当激光脉冲的功率很高时,光脉冲与光纤介质相互作用,产生高阶非线性效应,高阶非线性效应会严重影响激光脉冲的传输,它产生的噪声光叠加在原始激光脉冲上,使脉冲发生畸变。实验中通过加大光脉冲的功率,测得当进入光纤的功率约为 2700 W 时,在光纤中产生了非线性效应,如图 5 所示。说明多模光纤的功率承受能力较强。在实际应用中,可以较多地耦合光功率到多模光纤中。

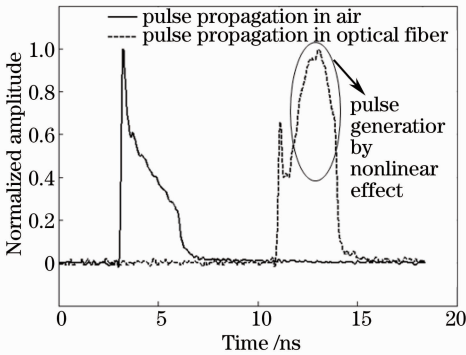


图 5 光纤中的非线性效应

Fig. 5 Nonlinear effect in optical fiber

#### 4.5 光纤并束测量演示实验

将两根芯径为 25  $\mu\text{m}$  光纤的尾部做成光缆结构,用一个光电管接收光纤尾部的输出光,并将电信号输入到一个示波器通道。为了能将相邻脉冲分隔开来,两个相邻脉冲的时间间隔应根据实际脉冲的

底宽来确定。演示实验中,两段光纤取 4 m 的长度差,激光脉冲在光纤中传输 1 m 所用时间约为 5 ns,两个脉冲的间隔约为 20 ns,演示实验结果如图 6 所示。在实际应用中,一个示波器通道上最长光纤与最短光纤的长度差由示波器的记录长度决定,而每两根光纤的最小长度差由所测量脉冲的底宽决定,要保证能够将任意两个脉冲分隔开来。从演示实验结果来看,只要光纤传输产生的时延差在示波器的记录长度内,在光缆结构中增加几根光纤,只要长度合适,均能够进行光纤并束测量。

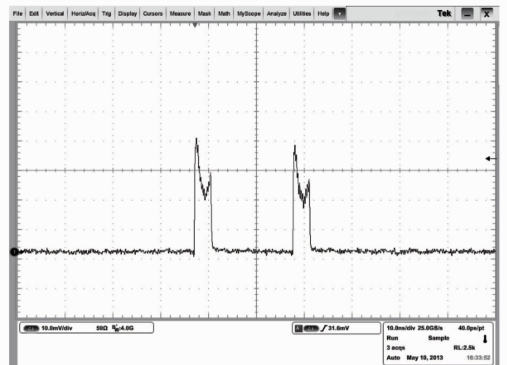


图 6 演示实验脉冲图

Fig. 6 Pulse of demonstration experiment

## 5 结 论

分析了紫外激光脉冲在紫外特种光纤中的传输特性,并对影响脉冲传输测量的因素进行了理论分

析和模拟计算,同时进行了实验验证,研究结果表明:紫外纳秒激光脉冲经过芯径为 100  $\mu\text{m}$  的光纤传输时,若光纤较短,脉冲展宽小,畸变不严重。但是当光纤较长时,经过光纤传输的脉冲畸变严重,因此,不宜用芯径为 100  $\mu\text{m}$  的光纤作长距离激光脉冲传输介质。对于芯径为 25  $\mu\text{m}$  的光纤,当光纤较长时,激光脉冲经过光纤传输后产生的畸变在所允许的测量误差范围内,可以作为紫外激光脉冲的取样传输介质。演示实验结果说明,利用光纤取样并束测量高功率紫外纳秒激光脉冲是可行的。

### 参 考 文 献

- Zhao Dongfeng, Wang Li, Lin Zunqi, *et al.*. Experimental study of 351 nm propagation with high fluence on No. 9 system of SG-II laser facility[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(7): 0702001.  
赵东峰, 王 利, 林尊琪, 等. 在神光 II 装置第九路系统开展 351 nm 波长激光高通量传输的实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0702001.
- Liu Hua, Xu Longbo, Peng Zhitao, *et al.*. Temporal multiplexing for measurement of temporal profile on SG-III prototype laser facility[J]. Laser Technology, 2010, 34(2): 157-160.  
刘 华, 徐隆波, 彭志涛, 等. 神光-III 原型装置多路激光近红外时间波形测量系统[J]. 激光技术, 2010, 34(2): 157-160.
- Zhao Xinghai, Gao Yang, Xu Meijian, *et al.*. Power delivery characteristics of fibers for high-peak power pulse laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(3): 444-448.  
赵兴海, 高 杨, 徐美健, 等. 高功率脉冲激光的光纤传输特性[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(3): 444-448.
- Zhao Xinghai, Gao Yang. A novel coupling technique of optical fiber for high peak power pulse laser[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(12): 1639-1642.  
赵兴海, 高 杨. 一种新型高功率激光注入光纤耦合技术 [J]. 中国激光, 2007, 34(12): 1639-1642.
- S Thomas, B Boyd, D T Dvais, *et al.*. Temporal multiplexing for economical measurement of power versus time on NIF[C]. SPIE, 1997, 3047: 700-706.
- P Leclerc, V Allouche. Temporal response diagnostic for the megajoule laser[C]. SPIE, 1999, 3492: 843-850.
- D Milan, C Thompson, W Sell, *et al.*. Measurements at 351 nm of Temporal Dispersion in Fibers[R]. Livermore: University of California, Radiation Laboratory, 1998. 1-24.
- Song Yang, Wang Li. Effect of fiber dispersion on pulse width [J]. Laser Technology, 2008, 32(6): 568-571.  
宋 扬, 王 丽. 光纤色散效应对脉冲展宽的影响[J]. 激光技术, 2008, 32(6): 568-571.
- Liu Deming, Sun Junqiang, Lu Ping, *et al.*. Fiber Optics[M]. Beijing: Science Press, 2008. 89-99.  
刘德明, 孙军强, 鲁 平, 等. 光纤光学[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 89-99.
- Zhao Xinghai, Hu Jianping, Gao Yang, *et al.*. Experiment on delivery of megawatt Nd:YAG laser pulses by large-core optical fibers[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 1934-1938.  
赵兴海, 胡建平, 高 杨, 等. 大芯径光纤传输兆瓦级 Nd:YAG 激光脉冲实验[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 1934-1938.
- Chen Wei, Meng Zhou. Effects of phase modulation on threshold of stimulated Brillouin scattering in optical fibers[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0305002.  
陈 伟, 孟 洲. 相位调制对光纤受激布里渊散射阈值的影响 [J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0305002.
- Govind P Agrawal. Nonlinear Fiber Optics, Fourth Edition & Applications of Nonlinear Fiber Optics, 2nd Edition [M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. 205-269.  
阿戈沃. 非线性光纤光学原理及应用(第二版)[M]. 贾东方, 余震虹译. 北京: 电子工业出版社, 2010, 205-269.
- P Pepeljugoski, S E Golowich, A J Ritger, *et al.*. Modeling and simulation of next-generation multimode fiber links [J]. J Lightwave Technology, 2003, 21(5): 1242-1255.

栏目编辑: 宋梅梅