

文章编号 1004-924X(2012)02-0264-06

## 光纤色散法测量闪烁体脉冲光谱

魏福利\*, 王培伟

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

**摘要:**提出了一种利用光纤波长色散测量脉冲光谱的方法。由于具有较宽光谱的脉冲光在一定长度的光纤中传播时会发生波形展宽,需要根据测量和标定结果校正展宽的波形才能得到光源的实际光谱曲线。标定时首先利用 ps 级脉冲光源对测量系统进行时间响应标定,得到系统的时间响应函数;接着测量不同波长光的走时,得到不同波长的群折射率;最后测量光纤中的光谱衰减,得到各种波长的相对衰减或传输效率。利用以上 3 个标定结果,对波形进行数字逆卷积,并进行走时校正和衰减系数校正,即可对所得到的波形进行恢复。经实验测量和数据处理,得到了一种红光闪烁体的发光光谱曲线,其中心波长与用其他方法测到的中心波长的差小于 2 nm,谱线形状基本一致。研究显示,在脉冲光的脉冲宽度远小于其色散展宽时,可以利用光纤的波长色散对脉冲光的光谱进行测量。

**关键词:**光纤色散;脉冲光谱;发光光谱;闪烁体

**中图分类号:**TN253;O433.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122002.0264

## Measurement of pulse spectra for scintillator based on fiber dispersion

WEI Fu-li\*, WANG Pei-wei

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

\* Corresponding author, E-mail: weifuli01@163.com

**Abstract:** A new method to measure the spectrum of a pulse light was developed. As the pulse width could be broaden due to the dispersion when a pulse light passed through the optical fiber, the calibration and measurement were proposed to correct and recover the broaden waveform to obtain the real spectrum of a pulse light source. In calibration, the time response function of measuring system was gotten with a ps laser firstly; then the group refractive indexes at different wavelengths were obtained by measuring the time delay of given wavelengths; finally, the relative attenuation index of each wavelength in optical fiber was given by measuring the spectral attenuation. On the basis of the calibration results mentioned above, broaden waveform was recovered by the digital deconvolution, time delay and attenuation. The pulse spectrum of a red scintillator was measured with this method. Results demonstrate that the difference of the center wavelength of the scintillator given by this method and other methods is less than 2 nm, which shows the spectra of pulse light can be measured based on fiber dispersion when the pulse width is much less than its dispersion.

**Key words:** optical fiber dispersion; pulse light spectrum; luminescent spectrum; scintillator

收稿日期:2011-06-29;修订日期:2011-09-05.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 10035020)

### 1 引言

光在光纤中传输时会发生色散,而对于宽光谱来说,波长色散占主要地位<sup>[1]</sup>。一般情况下,应该努力避免色散以保证信号不发生畸变<sup>[2-4]</sup>,但某些情况下也可以利用色散做一些有用的工作。

在脉冲辐射场测量技术中,要用到各种类型的闪烁体<sup>[5]</sup>,一般闪烁体所给的光谱均是用直流源激发出的光谱<sup>[6]</sup>,而闪烁体的脉冲光谱与直流光谱是不相同的。脉冲射线束激发闪烁体发光光谱的测量,需要利用脉冲射线源激发闪烁体,单色仪分光后,每次测量一个波长,多次测量并利用插值得到全光谱<sup>[7]</sup>。脉冲射线源一般为大型设备,运行效率低,使用价格昂贵,且每次运行状态不尽相同,数据起伏较大。目前的光谱仪系统基本是测量稳态光源的光谱<sup>[8]</sup>,而光纤光栅作为光谱选择器件,得到了很广泛的应用,但其应用范围基本限于通信波段,对应的波长范围很窄<sup>[9-11]</sup>。本文提出了一种利用光纤波长色散测量脉冲光谱的方法,该方法适用于光源脉冲宽度小而光谱较宽的情况,其特点是在系统标定完成后,利用数据处理,只需要一次脉冲激发就可以得到闪烁体的全光谱。

### 2 宽光谱脉冲光在光纤中传输的展宽

为了研究闪烁体发光在光纤中的传输规律,测量了不同谱宽情况下的脉冲展宽,实验示意图如图 1 所示。

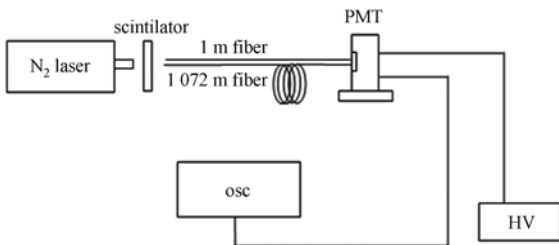


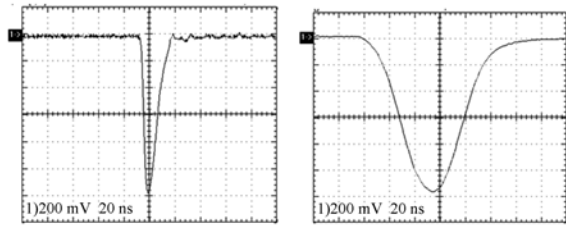
图 1 光纤中脉冲光色散测量示意图

Fig. 1 Measurement system schematic of pulse light dispersion in fiber

氮分子激光器激发闪烁体发光,经光纤传输后由光电倍增管转换为电信号,由电缆传输到示

波器进行记录,经过 1 m 和 1 072 m 光纤后的波形如图 2 所示。

实验中使用的红光闪烁体,发光光谱从 480 nm 到 700 nm。



(a) 光纤长度 1 m (b) 光纤长度 1 072 m

(a) For 1 m fiber in length (b) For 1 072 m fiber in length

图 2 脉冲光经过不同长度光纤后的输出波形

Fig. 2 Output waveform of pulse light passing through the fiber with different lengths

利用 ps 级红光激光器(光谱宽度小于 1 nm),经过 1 m 和 1 072 m 光纤传输,进行测量,得到的波形如图 3 所示。传输 1 m 时,波形半高宽为 5.15 ns,而传输 1 072 m 后,半宽为 6.65 ns,展宽 1.5 ns,即材料色散和模间色散引起的总展宽只有 1.5 ns。根据文献<sup>[4]</sup>中所给的色散率,其中模间色散造成的展宽小于 1 ns,而模间色散与光谱宽度是没有关系的,所以,图 2(b)中的波形展宽主要是由于波长色散造成的。在以下的研究中,忽略模间色散。

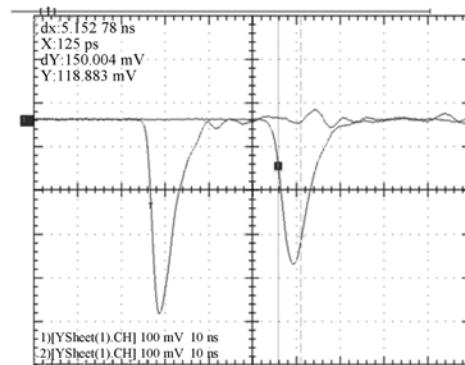


图 3 ps 级红脉冲光经 1 m(左)和 1 072 m(右)光纤后的波形

Fig. 3 Output waveform of ps red pulse light passing through 1 m fiber (left) and 1 072 m fiber (right)

### 3 闪烁体脉冲光谱测量

#### 3.1 实验系统建立

实验测量系统基本构成如图 1 所示,主要由 3 部分组成:紫外脉冲光源、光纤和光电探测器。

用氮分子激光器作为激发源,其脉冲宽度约为 800 ps,波长为 336 nm,可激发比其波长长的闪烁体发光。

光纤的选择需要综合考虑色散和衰减两个方面。信号经过光纤传输后,延时展宽越宽,测量的光谱分辨率越高,因此,光纤越长越好。然而光纤越长损耗越大,信号将小于探测系统的下限,使得短波长部分测量失真严重。通过实验,最终选择长度约 1 000 m 的光纤作为色散器件。

选用滨松 R636-10 型光电倍增管作为光电探测器,其上升时间为 2 ns, $\delta$  脉冲响应半高宽小于 4 ns,在 300~800 nm 其有较平的光谱响应。校正光谱时忽略了电倍增管的光谱响应校正,也就是将所测的光谱归一化到光电倍增管的响应曲线。

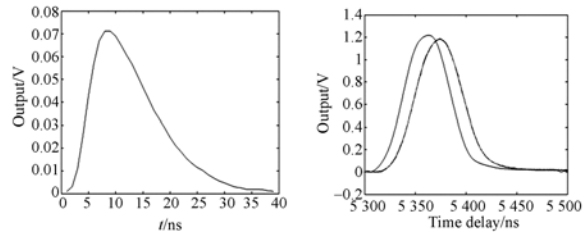
#### 3.2 波形反卷积处理

闪烁体受脉冲氮分子激光器激发发光,经光纤传输耦合至光电倍增管,信号  $S(t)$  由示波器记录。由于氮分子激光器脉冲脉宽小于 800 ps,相对于信号可近似为  $\delta$  脉冲,因此  $S(t)$  可表示为

$$S(t) = f(t) * h(t), \quad (1)$$

式中  $f(t)$  为  $\delta$  光脉冲经光纤传输后的时间谱,是恢复光谱所需的波形; $h(t)$  为闪烁体和光电倍增管相结合的时间响应函数,可以通过实验测量得到。

利用  $S(t)$  和  $h(t)$  进行反卷积,就可以得到  $f(t)$ 。图 4(a) 所示的是经实验测量并归一化后得到的卷积核函数  $h(t)$ ,其半高宽为 10 ns。利用最小平方约束复原方法对波形进行复原处理<sup>[12]</sup>,得到的波形如图 4(b) 所示。图 4(b) 中右边波形为示波器得到的原始波形(数据处理时负信号转换成了正信号),左边为使用平滑约束滤波器复原方法后得到的波形,用复原后的波形与卷积函数  $h(t)$  再次卷积得到的波形,该波形与原始波形几乎重合,说明反卷积过程是合理的。原始波形半高宽为 53 ns,处理后波形半高宽为 51 ns,且波形前移约 15 ns。



(a) 卷积核

(b) 原始波形(右)与逆卷积后的波形(左)

(a) Convolution core

(b) Original curve(right) and the curve after deconvolution

图 4 卷积核及原始波形与反卷积后波形

Fig. 4 Convolution core, original curve and the curve after deconvolution

#### 3.3 波长位置关系校正

$n(\lambda) - \lambda$  关系测定是很重要的一步。得到  $n(\lambda)$ , 即可从时间谱  $f(t)$  得到光谱分布  $f'(\lambda)$ 。确定各波长的位置关系,关键在于测量各波长在光纤中的时延。测量所有波长的时延是不可能的,变通的方法是利用群折射率计算各个波长的延时。光纤长度已知时,可根据(3)式求出相应波长对应光纤中心的折射率  $n(\lambda)$ 。

$$n(\lambda) = \frac{ct(\lambda)}{L}, \quad (2)$$

式中  $L$  为光纤长度,  $c$  为光在真空中的速度,  $t(\lambda)$  波长为  $\lambda$  的光在光纤中的传输时延。

由于在可见光区域(包括近紫外和近红外, 200~800 nm)附近属于正常色散区,  $n(\lambda) - \lambda$  关系满足柯希方程<sup>[13-14]</sup>,

$$n = a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4} + \dots \quad (3)$$

通常精度要求不高情况下只取前两项就足够了,即

$$n = a + \frac{b}{\lambda^2}. \quad (4)$$

所以可根据测量的几组数据拟合确定式(4)中的常数  $a, b$ , 从而确定  $n(\lambda) - \lambda$  关系。

实验中,通过氮分子激光激发红光闪烁体,后面加不同波长的干涉滤光片产生不同中心波长的窄光谱脉冲光,测量其在 1 072 m 七芯光缆中的走时。实验布置如图 3 所示,实验数据如表 1 所示。

数据代入式(4),并用最小二乘法处理,得到

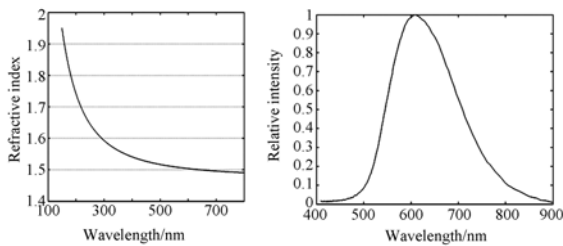
$$n = 1.474 + \frac{10\ 716.261}{\lambda^2}. \quad (5)$$

根据式(5)可得到多模渐变性光纤群折射率与波长的关系,如图 5(a)所示。根据折射率与时延的关系,求出各波长对应的时延,将波长与时延一一对应,然后根据图 4(b)将时延转换成波长,得到图 5(b)中波长强度分布。

表 1 不同波长的光在 1 072 m 光纤中的走时

Tab. 1 Time delay of lights with different wavelengths passing thouth 1 072 m fiber

波长 $\lambda$ /nm	走时 $t$ /ns
662	5 359
627	5 368
595	5 378
585	5 383
548	5 399



(a)群折射率与波长的关系 (b)各波长的强度分布  
(a)Group refractive index vs wavelength (b)Relative intensity of wavelength

图 5 多模渐变性光纤群折射率与波长的关系及波长强度分布

Fig. 5 Group refractive index vs wavelength and the relative intensity of wavelength obtained from their relationship

### 3.4 光谱衰减校正

不同波长的光经过光纤传播衰减不同,因此要进行衰减校正才能得到最终的光谱。需要测量的是光谱分布的相对强度,所以不必测量光纤中各波长的绝对衰减,只需测相对衰减就可以了。测量系统结构如图 6 所示,实际测量的是光在光纤中的相对传输效率。测量分两步进行,先直接测量白光源光谱,然后测量白光源经 1 072 m 七芯光纤束传输后得到的光谱,两者相除得到光谱相对传输系数,结果如图 7 所示。

图 7 是经 1 072 m 光纤传输后的光谱相对传输效率与波长的关系。根据该曲线,对图 5 中的波形进行校正,得到的光谱相对强度分布如图 8

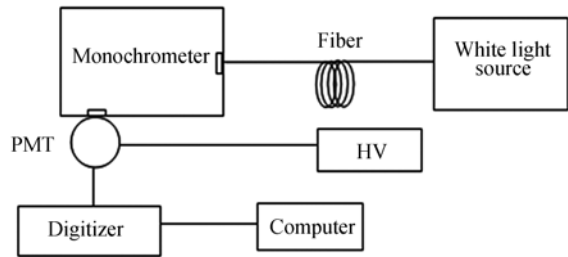


图 6 光纤光谱衰减测量系统示意图

Fig. 6 Schematic of measurement system for pulse light dispersion in fiber

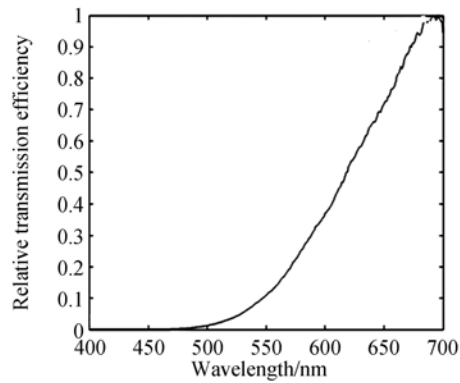
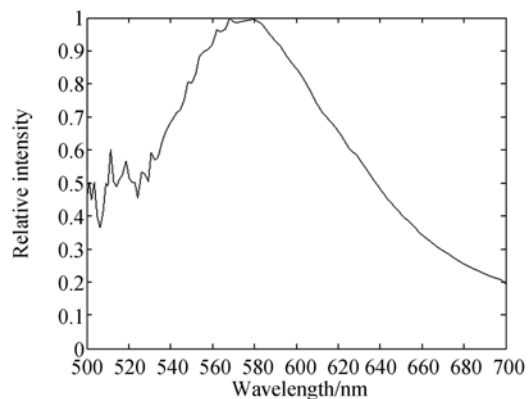


图 7 不同波长的光经过 1 072 m 光纤束的相对传输效率

Fig. 7 Transmission efficiency of lights with different wavelengths passing through 1 072 m fiber

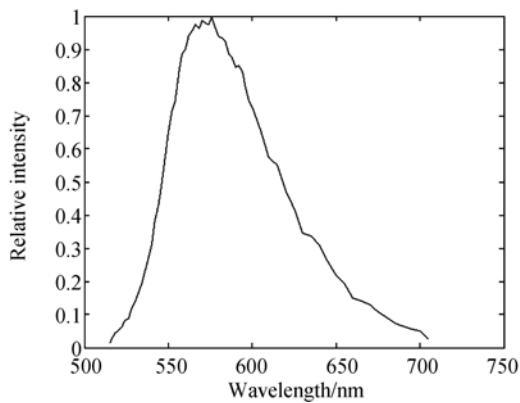
中曲线所示。

为了比对结果,图 8 给出了用氮分子激光器多次激发,直接测量不同波长相对强度得到的红光闪烁体发光光谱。从图中可以看出,中心波长大致相当,约为 580 nm,但是校正得到的光谱比直接光谱要宽。分析原因在于:(1)光电倍增管和



(a)光纤色散法测量结果

(a)Result of fiber dispersion method



(b) 氮分子激光器重复激发闪烁体得到各光谱相对强度  
(b) Relative intensity of each spectrum stimulated by  $N_2$  laser

图 8 测量到的红光闪烁体发光光谱

Fig. 8 Spectrum of red scintillator

闪烁体的时间响应造成波形展宽,信号有拖尾,虽然经过反卷积,但没有完全消除;(2)测量系统线性动态范围不足,经衰减校正后结果偏大。这些综合因素共同造成了信号展宽,最终导致数据处

#### 参考文献:

- [1] 刘德明,向清,黄德秀. 光纤光学[M]. 北京:国防工业出版社,1995:60-67.  
LIU D M, XIANG Q, HUANG D X. *Fiber Optics* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995: 60-67. (in Chinese)
- [2] 杨慧敏. 色散对光脉冲在光纤中传输的影响[J]. 菏泽学院学报,2011,33(2):53-55.  
YANG H M. The influence of the dispersion on optical in optical fiber transmission[J]. *Journal of Heze University*, 2011, 33(2):53-55. (in Chinese)
- [3] 李院平. 光纤传输过程中的色散特性[J]. 光谱实验室学报,2011,28(3):1412-1414.  
LI Y P. Dispersion characteristics in optical fiber transmission[J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2011,28(3):1412-1414. (in Chinese)
- [4] 隋可融,朱晓松,汤晓黎,等. 空芯光纤中介质层色散的研究[J]. 光学学报,2008,28(11):2062-2066.  
SUI K R, ZHU X S, TANG X L, *et al.*. Study on atrerial dispersion of dielectric layer in hollow fiber [J]. *Acta Optical Sinica*, 2008, 28 (11): 2062-2066. (in Chinese)
- [5] 刘兆庆. 脉冲辐射场诊断技术[M]. 北京:科学出版社,1994:130-143.  
LIU ZH Q. *Pulse Radiative Field Diagnostic*

理后得到的光谱比实际光谱变宽。以上结果经过校正,就能够得到符合实际的闪烁体发光光谱。

## 4 结 论

本文探索了利用光纤材料色散测量闪烁体脉冲光谱的方法,测量了一种红光闪烁体的脉冲光谱,结果与用其他方法测量的基本一致,说明提出的方法中光纤材料色散的数学简化模型是有效的。不过,闪烁体本身及光电倍增管的时间响应,造成信号的拖尾,测量系统动态范围限制及光纤的模间色散等因素,最终导致数据处理后得到的光谱比际光谱变宽,因此,下一步的工作将是设计时间特性更好、动态范围更大的探测系统,力争将探测下限提高一个量级,使衰减校正更加准确;另外,也要探索更好的反卷积算法,更好地消除闪烁体和光电倍增管时间响应的影

- 响等。实验中采用了紫外激光作闪烁体的激发源,但本方法可以用于脉冲射线束激发闪烁体的发光光谱测量。
- Technology*[M]. Beijing: Science Press, 1994:130-143. (in Chinese)
- [6] 彭博栋,盛亮,任国浩,等. Lu0.3Y0.7AP 闪烁晶体发光特性测量[C]. 中国核学会 2009 年学术年会论文集,2009,1(7):491.  
PENG B D, SHENG L, RENG G H, *et al.*. Measurements of luminescence characterize of Lu0.3Y0.7AP crystal[C]. *Annual Meeting of Chinese Nuclear Achdemy*, 2009,1(7):491. (in Chinese)
- [7] 张永生,郑国鑫. 500 fs 紫外激光系统及其在闪烁体荧光特性测试中的应用[J]. 光学精密工程, 2011,19(2):475-481.  
ZHANG Y SH, ZHENG G X. 500 fs UV laser system and its application to fluorescence test of thin film scitillators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2):475-481. (in Chinese)
- [8] 郑玉权,王慧,王一凡. 星载高光谱成像仪光学系统的选择与设计[J]. 光学精密工程,2009, 17(11):2629-2637.  
ZHENG Y Q, WANG H, WANG Y F. Selection and design of optical systems for spaceborne hyperspectral imagers[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11):2629-2637. (in Chinese)
- [9] 朱灵,陈明星,方杰,等. 光纤傅里叶变换光谱术在光纤光栅传感解调中的应用[J]. 光学精密工程,

- 2010,18(12):2537-2542.
- ZHU L, CHEN M X, FANG J, *et al.*. Application of fiber Fourier transform spectroscopy to fiber Bragg grating demodulation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(12): 2537-2542. (in Chinese)
- [10] 王安,朱灵,张龙,等. 全光纤傅里叶变换光谱仪的关键技术研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 19(7):1777-1780.
- WANG AN, ZHU L, ZHANG L, *et al.*. Research on key technologies of all fiber optic Fourier transform spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 19(7):1777-1780. (in Chinese)
- [11] 李保生,刘勇,于清华,等. 光纤傅里叶变换光谱仪采样系统[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(1):16-21.
- LI B SH, LIU Y, YU Q H, *et al.*. Sampling system of optical fiber Fourier transform spectrometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1): 16-21. (in Chinese)
- [12] 邹谋炎. 反卷积和信号复原[M]. 北京:国防工业出版社,2001:93-97.
- ZOU M Y. *Deconvolution and signal recovery* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001:93-97. (in Chinese)
- [13] 姚启钧. 光学教程[M]. 北京:高等教育出版社, 1989.
- YAO Q J. *Optics Tutorial* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1989. (in Chinese)
- [14] 薛长喜,崔庆丰,杨亮亮,等. 基于柯西色散公式的多层衍射光学元件设计和分析[J]. *光学学报*, 2011, 31(6):254-258.
- XUE CH X, CUI Q F, YANG L L, *et al.*. Design and analysis of multi-layer diffractive optical elements with Cauchy dispersion formula[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(6):254-258. (in Chinese)

#### 作者简介:



**魏福利**(1973—),男,陕西临潼人,副研究员,1996年于西北工业大学获得学士学位,2005年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事脉冲辐射场诊断和数字化高速成像技术的研究。E-mail: weifuli01@163.com



**王培伟**(1976—),男,陕西宝鸡人,硕士,助理研究员,2003年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事脉冲辐射场诊断和数字图像处理技术方面的研究。E-mail: wpw163@163.com