

# 高非线性硫系玻璃光子晶体光纤研究进展

曹凤珍 张培晴\* 戴世勋 王训四 徐铁峰 聂秋华

(宁波大学信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

**摘要** 近年来,硫系玻璃光子晶体光纤作为一种新型中红外光子晶体光纤备受关注。总结了基于硫系玻璃的光子晶体光纤的特性及研究现状,重点对其非线性光学效应及应用进行了分析,并介绍了提高及测量光纤非线性系数的方法。最后对其发展前景进行了展望。

**关键词** 光纤光学;硫系玻璃;光子晶体光纤;高非线性;非线性系数

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.060003

## Research Progress of High-Nonlinearity Photonic Crystal Fiber Based on Chalcogenide Glass

Cao Fengzhen Zhang Peiqing Dai Shixun Wang Xunsi Xu Tiefeng Nie Qiuhua

(College of Information Science and Engineering, Ningbo University,

Ningbo, Zhejiang 315211, China)

**Abstract** In recent years, as a novel mid-infrared photonic crystal fiber (PCF), chalcogenide glass PCFs have attracted much attention. We summarize the properties of chalcogenide glass PCF and its research progress, especially the nonlinear optical effect and its applications. The methods to improve and measure the nonlinear coefficient are also introduced. Finally, the development prospects are discussed.

**Key words** fiber optics; chalcogenide glass; photonic crystal fiber; high nonlinearity; nonlinear coefficient

**OCIS codes** 060.2290; 060.4370; 060.5295

### 1 引言

近年来,光子晶体光纤(PCF)引起了各国科研人员的广泛关注。其包层中的空气孔微结构已经超出了普通光纤光学和光波导的范畴,由于其设计上的灵活性,PCF具有许多传统光纤无法比拟的特性,如无截止单模、零色散点可调、高双折射效应以及高非线性特性等<sup>[1]</sup>。

高非线性 PCF 一般都设计成纤芯很小,包层为周期性排列的空气孔,且占空比(包层横截面中气孔总面积与孔壁总面积之比)很高,有些高达 90%。这种结构的光纤类似于纤芯悬于空气中,可以把光很好地限制在纤芯里,因此具有很高的非线性效应。PCF 的非线性效应具有许多重要的应用,如超连续谱、全光开关、拉曼放大和波长变换等。

硫系玻璃是无机非氧化物玻璃材料中的一大类,以第 VI 主族的 S、Se、Te 为主要成分,结合 As、Ge、P、Sb、Al、Si 等元素化合形成玻璃态物质;另外,还可以引入卤素形成硫卤化物玻璃<sup>[2]</sup>。作为一种比较新型的红外光学玻璃,硫系玻璃除了具有普通光学玻璃的优点之外,还具有优良的中远红外透过性能(依据组成不同,其透过范围可从 0.5~1 μm 到 12~25 μm<sup>[3]</sup>)和极高的非线性折射率系数  $n_2$  [ $n_2 = (2\sim 20) \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$ , 是石英材料的 100~1000 倍]。利用其优良的红外透过特性,硫系基质的 PCF 被广泛应用于中红外激光能量传输、空间消零干涉仪、中红外生物和化学传感器、中红外光纤激光器等领域<sup>[4~6]</sup>。利用其极高的非线性特性,硫系基

**收稿日期**: 2013-03-07; **收到修改稿日期**: 2013-03-21; **网络出版日期**: 2013-05-28

**基金项目**: 国家自然科学基金(61177087)、科技部重大国际合作项目(2001DFA12040)、教育部新世纪优秀人才计划(NCET-10-0976)、浙江省杰出青年基金(R1101263)、浙江省自然科学基金(LQ12F05004)、宁波市新型光电功能材料及器件创新团队项目(2009B21007)、宁波市自然科学基金(2012A610116)和宁波大学王宽诚幸福基金资助课题。

**作者简介**: 曹凤珍(1989—),女,硕士研究生,主要从事红外硫系玻璃光纤非线性方面的研究。E-mail: cfz229@163.com

**导师简介**: 聂秋华(1954—),男,教授,主要从事光通信和光纤材料等方面的研究。E-mail: nieqiuhua@nbu.edu.cn

质的 PCF 可应用于红外波段的非线性光学(如超连续谱产生)、光器件(如拉曼放大)等领域<sup>[7,8]</sup>。因此,硫系玻璃被认为是一种在中远红外光源领域极有发展前景的激光材料,研究基于远红外硫系玻璃的超高非线性 PCF 具有重大意义。

2000 年,英国南安普顿大学的 Monro 等<sup>[9]</sup>报道了第一根基于 Ga-La-S 玻璃体系的折射率引导型硫系 PCF,其结构较为简单,纤芯为实心玻璃棒,由六根空芯玻璃管包围,外围为玻璃套管。2006 年,法国 Perfos 公司和法国雷恩大学联合报道了采用堆积法制备的一种结构相对复杂的折射率引导型  $\text{Ga}_5\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{10}\text{S}_{65}$  硫系 PCF<sup>[10]</sup>。2006 年底,美国海军实验室拉制出第一根光子带隙(PBG)硫系 PCF<sup>[11]</sup>,并获得了中红外超连续谱输出。从 2008 年起硫系 PCF 结构开始多样化<sup>[12]</sup>,包括蜂窝状结构、悬吊纤芯结构、六角晶格包层结构和竹笼网眼晶格包层结构等。2010 年,Coulombier 等<sup>[13]</sup>提出一种制备低损耗硫系 PCF 的新方法,且该方法对玻璃质量没有影响。2011 年,Granzow 等<sup>[14]</sup>报道了一种通过压力辅助方法,由含有硫属化物和 Si 的熔融玻璃做成的 PCF。硫系玻璃 PCF 的非线性相比其他基质材料更具优势,因此在各种光纤结构中,基于硫系玻璃 PCF 非线性特性的结构及应用备受国内外学者的关注。

本文对基于硫系玻璃的 PCF 在非线性光学方面的研究进展予以总结,介绍了提高和测量 PCF 非线性系数的方法,并对基发展前景进行了展望。

## 2 非线性光子晶体光纤的基本理论

### 2.1 非线性系数

光纤的非线性系数  $\gamma$  定义为

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_2}{A_{\text{eff}}}, \quad (1)$$

式中  $n_2$  为材料的非线性折射率系数,  $A_{\text{eff}}$  为光纤的有效模场面积,  $\lambda$  为真空中的波长。硫系玻璃具有高的线性折射率(2.0~3.5)和极高的非线性折射率 $[(2\sim 20) \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}]$ 。对于 As-S-Se 玻璃的硫化物光纤来说,其  $n_2$  的测量值可以达到石英光纤的 1000 倍,取决于硫系玻璃的组分<sup>[15~19]</sup>。2000 年,Lenz 等<sup>[18]</sup>实验测得  $\text{As}_2\text{Se}_3$  玻璃的  $n_2$  值为石英光纤的 500 倍。2004 年,Slusher 等<sup>[19]</sup>通过提纯工艺在更高纯度的  $\text{As}_2\text{Se}_3$  中将  $n_2$  值增大到石英基质的约 1000 倍。

### 2.2 提高 $\gamma$ 的方法

提高光纤的非线性可以有以下两种方法:1) 改变光纤的结构(PCF 的结构如图 1 所示),使光束的模场面积发生变化,即减小  $A_{\text{eff}}$ 。  $A_{\text{eff}}$  通常随纤芯直径的减小而减小,因此可通过缩小纤芯直径来达到目的。然而减小纤芯直径虽能增加纤芯单位面积上的光能量,但由于纤芯较小,耦合进光纤的总能量就受到限制,因此产生的非线性效应仍不会很强。另外,通过改变包层空气孔间距也可以调节  $A_{\text{eff}}$ 。Brederick 等<sup>[20]</sup>在  $1.5 \mu\text{m}$  波长处通过改变光纤包层结构,实现了光纤模场面积在  $1\sim 800 \mu\text{m}^2$  连续可调。2) 对光纤进行掺杂,即增大  $n_2$ 。使用掺杂的方法改变光纤内部的物质结构,使其非线性折射率发生变化,从而大幅度提高材料的非线性<sup>[20]</sup>。

2007 年,Smekala 等<sup>[21]</sup>制备了纤芯模场面积为  $13 \mu\text{m}^2$  的  $\text{Ge}_{15}\text{Sb}_{20}\text{Se}_{65}$  硫系 PCF。2009 年,Fatome 等<sup>[8]</sup>研制了 3 种极高非线性系数 $[227\sim 2000 (\text{W} \cdot \text{km})^{-1}]$ 的 3 层三角形空气孔结构的硫系 PCF(其特性参数如表 1 所示),其中  $\text{As}_{10}\text{Se}_{90}$  光纤的孔间距  $\Lambda$  为  $7 \mu\text{m}$ ,空气孔直径与孔间距比值( $d/\Lambda$ )为 0.42,有效模场面积为  $21 \mu\text{m}^2$ ,光纤在  $1.55 \mu\text{m}$  的损耗为 10 dB/m,其非线性系数  $\gamma$  高达  $2000 (\text{W} \cdot \text{km})^{-1}$ 。2010 年,Cherif<sup>[22]</sup>制备了在波长为  $2.8 \mu\text{m}$  时,超连续谱可以跨越超过 2 个振幅的高非线性  $\text{As}_2\text{Se}_3$  硫系 PCF,该光纤的孔间距  $\Lambda$  为  $1.77 \mu\text{m}$ ,空气孔直径  $d$  为  $1.26 \mu\text{m}$ 。2012 年,Mechin 等<sup>[23]</sup>制备出非线性系数高达  $46000 (\text{W} \cdot \text{km})^{-1}$  的 As-Se 硫系 PCF。

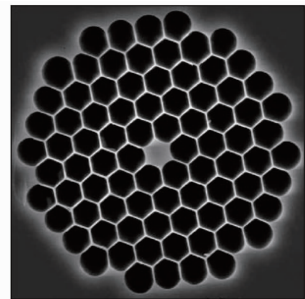


图 1 高非线性光子晶体光纤扫描电镜照片  
Fig. 1 Scanning electron microscopy (SEM) picture of high-nonlinearity PCF

表1 三种高非线性系数  $\gamma$  的硫系光子晶体光纤参数Table 1 Measured optical properties of three chalcogenide glass PCFs with high nonlinear coefficient  $\gamma$ 

Parameter	Fiber		
	Ge <sub>15</sub> Sb <sub>20</sub> S <sub>65</sub>	Ge <sub>15</sub> Sb <sub>20</sub> S <sub>65</sub>	As <sub>10</sub> Se <sub>60</sub>
$\Lambda / \mu\text{m}$	9	13.25	7
$d / \Lambda$	0.31	0.31	0.42
$A_{\text{eff}} / \mu\text{m}^2$	22	50	21
$\alpha / (\text{db}/\text{m})$	5	5.5	10
$D / [\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})]$	-421	-406	-760
$S / [\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})]$	0.9	1.1	2.7
DGD <sup>*</sup> / (ps/m)	5.5	0.8	1.24
$n_2 / (\text{m}^2/\text{W})$	$2.8 \times 10^{-18}$	$2.8 \times 10^{-18}$	$2.8 \times 10^{-18}$
$\gamma / (\text{W} \cdot \text{km})^{-1}$	517	227	2000

\* DGD: differetial group delay

### 2.3 非线性系数 $\gamma$ 的测量方法

目前已提出的非线性系数测量方法<sup>[24~30]</sup>主要有自相位调制(SPM)法、交叉相位调制(XPM)法和四波混频(FWM)法等。其中,自相位调制法又包括单脉冲激光器(P-LD)SPM法和双连续激光器(CW-LD)SPM法。

SPM法利用光纤非线性效应对脉冲频谱的展宽作用

$$\frac{\Delta\omega_{\text{rms}}}{\Delta\omega_0} = \left(1 + \frac{4}{3\sqrt{3}}\phi_{\text{max}}^2\right)^{1/2}, \quad (2)$$

式中  $\Delta\omega_{\text{rms}}$  表示均方根谱宽,  $\Delta\omega_0$  表示初始谱宽,  $\phi_{\text{max}}$  为最大非线性相移。可见,此方法测量的是最大非线性相移  $\phi_{\text{max}}$ , 为一个无量纲的量。又由

$$\phi_{\text{max}} = \frac{L_{\text{eff}}}{L_{\text{NL}}} = \gamma P_0 L_{\text{eff}}, \quad (3)$$

式中  $L_{\text{eff}}$  表示长度为  $L$  的光纤的有效长度,  $L_{\text{NL}}$  为非线性长度,  $\gamma$  为非线性系数,  $P_0$  为峰值功率。由(3)式可知,  $\phi_{\text{max}}$  和  $\gamma$  成正比关系。一旦  $\gamma$  值被确定下来, 利用(1)式就可以估算出  $n_2$  的值<sup>[31]</sup>。图2和图3分别是P-LD和CW-LD自相位调制的实验装置图。

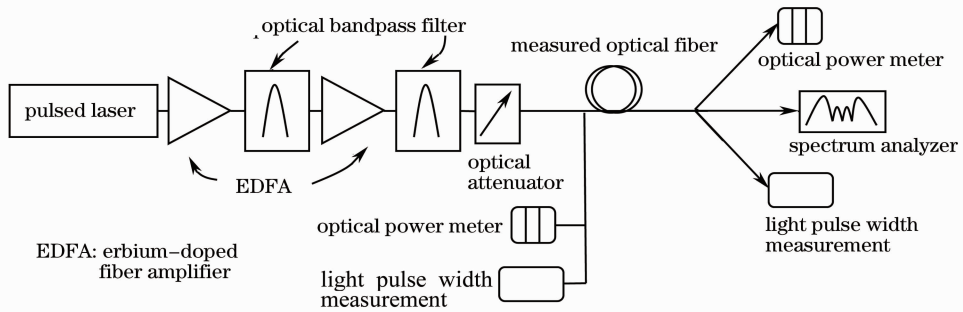


图2 单脉冲激光器 SPM 法的实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of the measurement using P-LD SPM

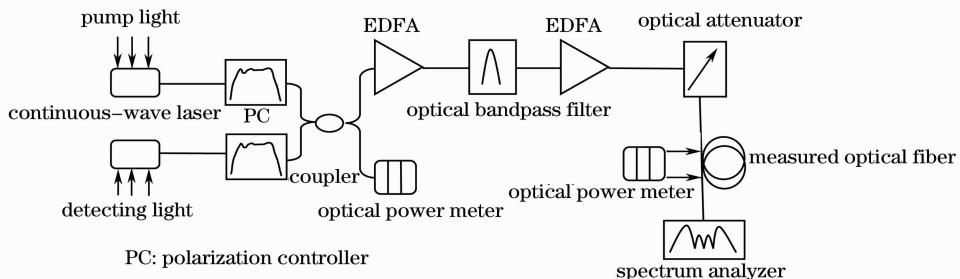


图3 双连续激光器 SPM 法实验装置图

Fig. 3 Experimental setup of the measurement using CW-LD SPM

### 3 研究热点和应用

#### 3.1 产生超连续谱

当一个超短强脉冲通过介质时,介质中的非线性效应可使得脉冲的频谱强烈展宽,从而获得一个超宽带的连续光谱<sup>[32]</sup>。这种超连续谱可应用于荧光成像、全反射式荧光显微、单分子成像、宽频光谱学、光学同断层扫描术和流式细胞仪等领域,因此引起了人们极大的研究兴趣。另外,硫系 PCF 具有可控的零色散点波长和高的非线性系数,被广泛应用于非线性光学方面。而其可调色散结构和无截止单模的设计有效地克服了常规光纤的缺陷,可显著改善光纤激光器的相关性能。因此,研究硫系 PCF 产生超连续谱具有重要的学术价值和实际应用价值。

天津大学研究人员利用高非线性光子晶体光纤(HN-PCF),将中心波长为 800 nm 的 30 fs 的钛宝石激光脉冲耦合入 2 m 长的该 HN-PCF 中,得到了 450~1400 nm 宽波段范围的超连续谱,图 4 为采用的实验装置图<sup>[33]</sup>。2006 年底,美国海军实验室 Sanghera 等<sup>[11]</sup>利用波长 2.5  $\mu\text{m}$  的 100 fs 脉冲激光(脉冲能量 100 pJ)抽运  $\text{As}_2\text{Se}_3$  基质 PBG-PCF,得到了 2.1~3.2  $\mu\text{m}$  波段的超连续谱。2009 年,Fatome 等<sup>[8]</sup>利用 1.55  $\mu\text{m}$  的 10 ps 脉冲激光抽运  $\text{Ge}_{15}\text{Sb}_{20}\text{S}_{65}$  硫系 PCF,得到了 1100~2200 nm 波段的超连续谱。2010 年,日本丰田工业大学 Yan 等<sup>[34]</sup>利用工作波长为 2000 nm,脉宽为 200 fs,峰值功率为 1000 W 的脉冲激光器抽运长度为 0.1 m 的  $\text{As}_2\text{S}_3$  硫系 PCF,获得了 1.4~3.1  $\mu\text{m}$  波段范围的超连续光谱,且光谱平坦度低于 4 dB,如图 5 所示。

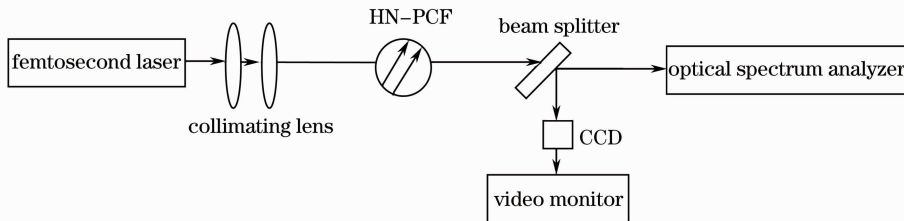


图 4 HN-PCF 的超连续光谱实验装置图

Fig. 4 Experimental installation drawing of HN-PCF's supercontinuum generation

#### 3.2 制作全光开关

全光开关是全光网络和下一代光分组/突发/标记交换网络中的核心部件之一。高速、偏振无关的高性能集成化全光开关是当前的热门研究课题<sup>[35]</sup>。其中,高开关阈值、低消光比和低开关速率是阻碍目前全光开关迅速发展和应用的最主要障碍。PCF 仅需要调节光纤中的空气孔大小比例和排列方式就可以实现对于光路的控制,所以 PCF 在实现光开关上不仅操作简单,并且更容易实现低开关阈值、高消光比和高开关速率。例如 PCF 特有的包层空气微孔结构,可以将不同的液体、气体和固体材料填充进去,从而制备出各种奇特的光开关器件<sup>[36]</sup>。

基于硫系玻璃 PCF 的全光开关的出现也极大地调动了研究者对于硫系玻璃材料研究的热情,一批新型的高非线性硫系玻璃,如  $\text{As}_{40}\text{S}_{40}\text{Se}_{20}$ 、 $\text{Ge}_{12.5}\text{As}_{25}\text{Se}_{62.5}$ 、 $\text{Ga}_{28}\text{La}_{12}\text{S}_{60}$  等相继出现,如表 2 所示<sup>[37~41]</sup>,表中 FOM 为开关优值系数,不同文献定义有所不同,通常定义为  $n_2/\beta\lambda$ ,也有按  $2\beta\lambda/n_2$  定义的, $\beta$  和  $\lambda$  分别为非线性吸收系数和波长。理论研究发现,利用上述硫系玻璃制作的全光开关,光纤长度只需 5~8 cm 即可实现开关功率小于 1 pJ<sup>[37]</sup>,表明了利用高非线性硫系玻璃光纤制作高速、低开关功率和紧凑型全光开关的广阔前景。

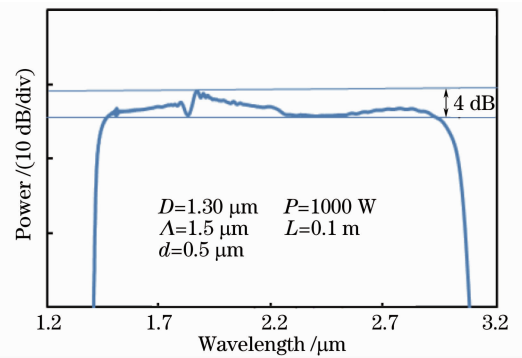


图 5  $\text{As}_2\text{S}_3$  硫系 PCF 产生的超连续谱

Fig. 5 Supercontinuum spectrum generated from a  $\text{As}_2\text{S}_3$  chalcogenide glass PCF

表 2 高三阶非线性硫系玻璃及其光学参数<sup>[37~41]</sup>Table 2 Parameters of chalcogenide glasses with high third-order nonlinearity<sup>[37~41]</sup>

Glass	$n_2 / (\text{cm}^2 / \text{W})$	$\beta / (\text{cm} / \text{GW})$	Wavelength / nm	FOM
As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	$1.4 \times 10^{-13}$	0.26	—	5
As <sub>40</sub> Se <sub>60</sub>	$2.3 \times 10^{-13}$	0.14	1550	11
GeSe <sub>4</sub>	$8 \times 10^{-14}$	0.5	1060	—
Ge <sub>28</sub> Se <sub>60</sub> Sb <sub>12</sub>	$11.3 \times 10^{-14}$	—	1500	3
Ag <sub>2</sub> As <sub>39</sub> S <sub>59</sub>	$102 \times 10^{-13}$	99.5	—	0.96
As <sub>10</sub> Se <sub>55</sub> Cu <sub>5</sub>	$2.1 \times 10^{-13}$	0.29	—	5
45La <sub>2</sub> S <sub>3</sub> · 65Ga <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	$44.9 \times 10^{-14}$	40	532	—
85GeS <sub>2</sub> · 15Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	$1.9 \times 10^{-14}$	<0.1	1064	<1.1*
Ge <sub>23</sub> Sb <sub>12</sub> Se <sub>65</sub>	$2 \times 10^{-14}$	<0.1	1064	<1.1*
Ge <sub>23</sub> Sb <sub>7</sub> S <sub>60</sub> Se <sub>10</sub>	$1.93 \times 10^{-14}$	<0.1	1064	<1.1*
Ge <sub>18</sub> Ga <sub>5</sub> S <sub>7</sub> Se <sub>70</sub>	$1.96 \times 10^{-14}$	<0.1	1064	<1.1*

\* FOM is defined as  $2\beta\lambda/n_2$

1992年,日本 NTT 光电实验室的 Asobe 等<sup>[37]</sup>采用一根长度仅 48 cm 的单模 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 硫系玻璃光纤成功演示了 1.3 μm 通信波长下开关功率为 14 W 的全光开关,开关速度达到 70 GHz。1993年,他们又利用一根 1.2 m 的单模 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 光纤实现了工作波长 1.5 μm 的全光开关,功率仅为 3 W,速度高达 100 GHz<sup>[42]</sup>。2001年, Petropoulos 等<sup>[43]</sup>提出了基于 PCF 的 SPM 效应的全光开关方案,图 6、图 7 分别为其实验装置图和频谱图<sup>[35]</sup>。2007年, Liu<sup>[44]</sup>将高非线性 PCF 和双向抽运掺铒光纤放大器引入 Sagnac 环形镜内,破坏了环形镜的对称性,利用 XPM 作用使反向传输的两路信号光产生非线性相移,从而实现了开关效应。

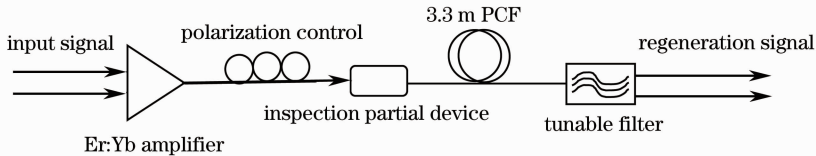


图 6 基于 SPM 效应的光开关实验装置图

Fig. 6 Experimental installation drawing of optical switch based on SPM effect

由于硫系玻璃的非线性折射率  $n_2$  比石英高 2~3 个数量级,因此相应的光纤长度或开关功率也低 2~3 个数量级。这为高速、低开关功率和紧凑型全光开关提供了重要的材料发展方向。目前,通过降低光纤损耗和芯径、提高芯包层折射率差以及改进开关结构等方法,用硫系玻璃光纤制作的非线性光纤全光开关的开关功率已降至 0.4 W<sup>[45]</sup>。

### 3.3 波长变换

利用非线性效应将某一输入波长变换为其他波长是目前波长变换中的重要技术。波长变换不仅大大拓展了目前激光光源的光谱范围,在全光通信网络中也有重要的应用。按照光纤中非线性效应的不同,目前的波长变换主要有以下四种:基于 SPM 的全光波长变换,基于 XPM 的全光波长变换,基于四波混频(FWM)的全光波长变换和基于孤子自频移(SSFS)的全光波长变换。

2000年, Aso 等<sup>[46]</sup>利用 100 m 高非线性色散位移光纤作为波长变换器,同时对 26 路波分复用信号进行波长变换,得到了近 91 nm 的变换带宽。2002年, Westlund 等<sup>[47]</sup>利用 115 m 高非线性光纤,通过提高受激布里渊散射阈值,获得了 61 nm 的变换带宽,其中抽运光波长调谐范围为 24 nm。2012年, Le 等<sup>[48]</sup>利用 GeAsSe 光纤实现了基于四波混频的波长变换,实验装置如图 8 所示,其中新的波长是由信号光和抽运光产

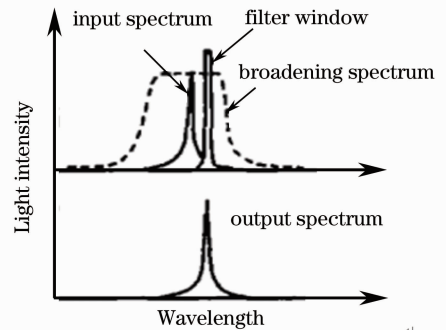


图 7 基于 SPM 效应的光开关频谱图

Fig. 7 Spectrum diagram of optical switch based on SPM effect

生的。图 9 为实验中产生的典型 FWM 效应光谱图,抽运波长为 1545 nm,信号波长为 1550 nm<sup>[49]</sup>。

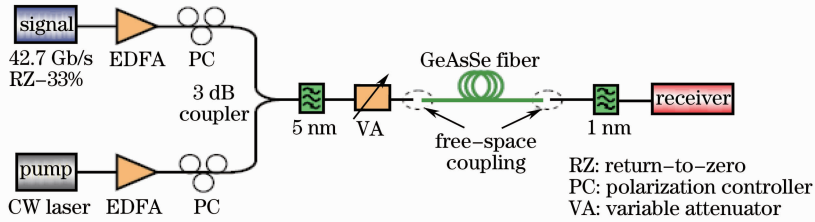


图 8 波长变换的实验装置图

Fig. 8 Experimental setup for wavelength conversion

## 4 结束语

硫系玻璃 PCF 具有优良的中远红外透过性能和高非线性特性,在超连续谱、全光开关、超短孤子脉冲传输、波长变换、拉曼放大和波分复用器等方面有着广阔的应用前景,更因其结构的可调性,使其有望比传统高非线性光纤更早地在相关器件中得到应用。随着硫系玻璃 PCF 相关制作工艺、传输理论、性能测试和器件耦合技术的不断改进和完善,硫系玻璃 PCF 在不久的将来一定会在各领域发挥更大的作用。

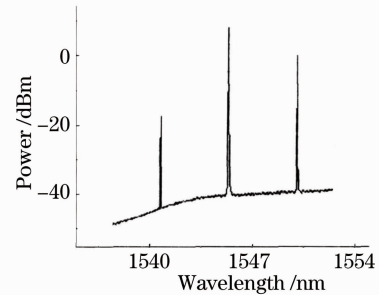


图 9 FWM 波长变换光谱图

Fig. 9 Wavelength conversion spectrogram of FWM

## 参 考 文 献

- 1 Dai Shixun, Yu Xingyan, Zhang Wei *et al.*. Research progress of chalcogenide glass photonic crystal fiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(9): 090602
- 戴世勋, 於杏燕, 张 巍 等. 硫系玻璃光子晶体光纤研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(9): 090602
- 2 Xu Yantao, Guo Haitao, Lu Min *et al.*. Research progress of high nonlinear chalcogenide glass[J]. *Materials Review*, 2010, **24**(10): 52~53
- 许彦涛, 郭海涛, 陆 敏 等. 高非线性硫系玻璃的研究进展[J]. *材料导报*, 2010, **24**(10): 52~53
- 3 F. Smektala, L. Brilland, T. Chartier *et al.*. Recent advances in the development of holey optical fibers based on sulfide glasses[C]. *SPIE*, 2006, **6128**: 61280M
- 4 M. El-Amraoui, G. Gadret, J. C. Jules *et al.*. Microstructured chalcogenide optical fibers from As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> glass: towards new IR broadband sources[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(25): 26655~26665
- 5 L. Brilland, F. Charpentier, J. Troles *et al.*. Microstructured chalcogenide fibers for biological and chemical detection, case study: a CO<sub>2</sub> sensor[C]. *SPIE*, 2009, **7503**: 750358
- 6 F. Prudeniano, L. Mescia, L. Allegretti *et al.*. Simulation of mid-IR amplification in Er<sup>3+</sup>-doped chalcogenide microstructured optical fiber[J]. *Opt. Mater.*, 2009, **31**(9): 1292~1295
- 7 N. J. Traynor, A. Monteville, L. Provino *et al.*. Fabrication and applications of low loss nonlinear holey fibers[J]. *Fiber and Integrated Optics*, 2009, **28**(1): 51~59
- 8 J. Fatome, C. Fortier, T. N. Nguyen *et al.*. Linear and nonlinear characterizations of chalcogenide photonic crystal fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(11): 1707~1715
- 9 T. M. Monro, Y. D. West, D. W. Hewak *et al.*. Chalcogenide holey fibres[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(24): 1998~2000
- 10 L. Brilland, F. Smektala, G. Renversez *et al.*. Fabrication of complex structures of holey fibers in chalcogenide glass[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(3): 1280~1285
- 11 J. S. Sanghera, I. D. Aggarwal, L. B. Shaw *et al.*. Nonlinear properties of chalcogenide glass fibers[J]. *J. Optoelectron. Adv. Mater.*, 2006, **8**(6): 2148~2155
- 12 K. S. Kim, R. Stolen. Measurement of the nonlinear index of silica core and dispersion-shifted fibers[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **267**(2): 505~510
- 13 Quentin Coulombier, Laurent Brilland, Patrick Houizot *et al.*. Casting method for producing low-loss chalcogenide microstructured optical fibers[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(9): 9107~9112

- 14 N. Granzow, P. Uebel, M. A. Schmidt *et al.*. Bandgap guidance in hybrid chalcogenide-silica photonic crystal fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(13): 2432~2434
- 15 M. Asobe, T. Kanamori, K. Kubodera. Applications of highly nonlinear chalcogenide glass fibers in ultrafast all-optical switches[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1993, **29**(8): 2325~2333
- 16 M. Asobe. Nonlinear optical properties of chalcogenide glass fibers and their application to all-optical switching[J]. *Opt. Fiber Technol.*, 1997, **3**(2): 142~148
- 17 S. Smolorz, I. Kang, F. Wise *et al.*. Studies of optical nonlinearities of chalcogenide and heavy-metal oxide glasses[J]. *J. Non-Crystal. Solids*, 1999, **256-257**: 310~317
- 18 G. Lenz, J. Zimmermann, T. Katsufuji *et al.*. Large Kerr effect in bulk Se-based chalcogenide glasses[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(4): 254~256
- 19 R. E. Slusher, G. Lenz, J. Hodelin *et al.*. Large Raman gain and nonlinear phase shifts in high-purity  $As_2Se_3$  chalcogenide fibers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2004, **21**(6): 1146~1155
- 20 N. G. R. Brederick, T. M. Monro, P. J. Bennett *et al.*. Nonlinearity in holey optical fibers: measurement and future opportunities[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(20): 1395~1397
- 21 F. Smekala, F. Desevedavy, L. Brilland *et al.*. Advances in the elaboration of chalcogenide photonic crystal fibers for the mid infrared[C]. *SPIE*, 2007, **6588**: 658803
- 22 R. Cherif. Highly nonlinear  $As_2Se_3$ -based chalcogenide photonic crystal fiber for midinfrared supercontinuum generation [J]. *Opt. Engng.*, 2010, **49**(9): 095002
- 23 D. Méchin, L. Brilland, J. Troles *et al.*. Recent advances in very highly nonlinear chalcogenide photonic crystal fibers and their applications[C]. *SPIE*, 2012, **8257**: 82570C
- 24 Gao Fei, Hou Lantian, Liu Zhaolun *et al.*. Research progress of photonic crystal fiber's nonlinear effect[J]. *J. Yanshan University*, 2008, **32**(2): 134~139  
高飞, 侯蓝田, 刘兆伦等. 光子晶体光纤中的非线性效应的研究进展[J]. 燕山大学学报, 2008, **32**(2): 134~139
- 25 K. S. Kim, R. Stolen. Measurement of the nonlinear index of silica core and dispersion-shifted fibers[J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(4): 257~259
- 26 A. Boskovic, S. V. Chernikov. Direct continuous wave measurement of  $n_2$  in various type of telecommunication fiber at 1.55  $\mu m$ [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(24): 1966~1968
- 27 Chen Guoqing. Measuring method of single-mode fiber's nonlinear coefficient at 1550 nm[J]. *Optical Fiber & Cable and Its Application Technology*, 2003, **15**(3): 20~23  
陈国庆. 单模光纤 1550 nm 波段非线性系数的测量方法[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2003, **15**(3): 20~23
- 28 Hua Ying, Chen Yongshi. Measurement method of single-mode fiber's nonlinear coefficient  $n_2/A_{eff}$ [J]. *Study on Optical Communications*, 2002, **28**(5): 46~50  
华颖, 陈永诗. 单模光纤非线性系数  $n_2/A_{eff}$  的测量方法[J]. 光通信研究, 2002, **28**(5): 46~50
- 29 P. Petropoulos, H. Ebendorff-Heidepriem, V. Finazzi *et al.*. Highly nonlinear and anomalously dispersive lead silicate glass holey fibers[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(26): 3568~3573
- 30 H. Chen. Simultaneous measurements of non-linear coefficient, zero-dispersion wavelength and chromatic dispersion in dispersion-shifted fibers by four-wave mixing[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **220**(4-6): 331~335
- 31 Govind P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics[M]. Jia Donggang, Yu Zhenhong, Tan Bin *et al.* Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. 317~321  
阿戈沃. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方, 余震虹, 谈斌等译. 北京: 电子工业出版社, 2010. 317~321
- 32 Wang Qingyue, Hu Minglie, Chai Lu. Progress in nonlinear optics with photonic crystal fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1): 57~66  
王清月, 胡明列, 柴路. 光子晶体光纤非线性光学研究新进展[J]. 中国激光, 2006, **33**(1): 57~66
- 33 Li Jinyan, Peng Jinggang, Jiang Zuowen *et al.*. Research and application of high nonlinear photonic crystal fiber[J]. *Study on Optical Communications*, 2008, **34**(4): 1~4  
李进延, 彭景刚, 蒋作文等. 高非线性光子晶体光纤的研究及应用[J]. 光通信研究, 2008, **34**(4): 1~4
- 34 X. Yan, C. Chaudhari, G. Qin *et al.*. Ultraflat supercontinuum generation in an  $As_2S_3$ -based chalcogenide core microstructured fiber[C]. *SPIE*, 2010, **7598**: 75981M
- 35 Chi Hao, Jiang Ming, Zhao Huandong *et al.*. Research progress of photonic crystal fiber's nonlinear effect and its application[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2003, **24**(5): 297~300  
池灏, 蒋铭, 赵焕东等. 光子晶体光纤的非线性效应及其应用研究进展[J]. 半导体光电, 2003, **24**(5): 297~300
- 36 Zheng Yunbao. Photonic crystal fiber and characteristics of its nonlinear functional device[J]. *Science & Technology Information*, 2009, (5): 4~5  
郑允宝. 光子晶体光纤及其非线性功能器件特性[J]. 科技资讯, 2009, (5): 4~5
- 37 M. Asobe, T. Kanomori, K. Kubodera. Ultrafast all-optical switching using highly nonlinear chalcogenide glass fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(4): 362~365
- 38 J. M. Harbold, F. Ö. Ilday, F. W. Wise *et al.*. Highly nonlinear Ge-As-Se and Ge-As-S-Se glasses for all-optical

- switching[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(6): 822~824
- 39 L. Petit, N. Carlie, K. Richardson *et al.*. Nonlinear optical properties of glasses in the system Ge/Ga-Sb-S/Se[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(10): 1495~1497
- 40 Zhou Zhonghua, Tadanori Hashimoto, Hiroyuki Nasu *et al.*. Two-photon absorption and nonlinear refraction of lanthanum sulfide-gallium sulfide glasses[J]. *J. Appl. Phys.*, 1998, **84**(5): 2380~2384
- 41 Kazuhiko Ogusu, Jun Yamasaki, Shinpei Maeda. Linear and nonlinear optical properties of Ag-As-Se chalcogenide glasses for all-optical switching[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(3): 265~267
- 42 M. Asobe, H. Ltoh, T. Miyazawa *et al.*. Efficient and ultrafast all-optical switching using high  $\Delta n$ , small core chalcogenide glass fibre[J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(22): 1966~1968
- 43 P. Petropoulos, T. M. Monro, W. Belardi *et al.*. 2R-regenerative all-optical switch based on a highly nonlinear holey fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(16): 1233~1235
- 44 Liu Jianguo, Kai Guiyun, Xue Lifang *et al.*. An all-optical switching based on highly nonlinear photonic crystal fiber Sagnac loop mirror[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(2): 941~945  
刘建国, 开桂云, 薛力芳 等. 基于高非线性光子晶体光纤 Sagnac 环形镜的全光开关[J]. *物理学报*, 2007, **56**(2): 941~945
- 45 M. Asobe, T. Ohara, I. Yokohama *et al.*. Low power all-optical switching in a nonlinear optical loop mirror using chalcogenide glass fibre[J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(15): 1396~1397
- 46 O. Aso, S. Arai, T. Yagi *et al.*. Broadband four-wave mixing generation in short optical fibers[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(8): 709~711
- 47 M. Westlund, J. Hansryd, P. A. Andrekson *et al.*. Transparent wavelength conversion in fiber with 24 nm pump tuning range[J]. *Electron. Lett.*, 2002, **38**(2): 85~86
- 48 S. D. Le, M. Gay, L. Bramerie *et al.*. Wavelength conversion in a highly nonlinear chalcogenide microstructured fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(22): 4576~4578
- 49 Gong Lei, Yin Feifei, Chen Hongwei *et al.*. Four wave mixing light wavelength conversion of photonic crystal fiber[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2010, **21**(9): 1320~1323  
龚磊, 尹飞飞, 陈宏伟 等. 基于光子晶体光纤四波混频的光波长变换[J]. *光电子·激光*, 2010, **21**(9): 1320~1323