

# 基于受激布里渊散射效应的硫系玻璃光器件研究进展

戴世勋<sup>1\*</sup>, 王莹莹<sup>2</sup>, 李杏<sup>1</sup>, 杨佩龙<sup>1</sup>, 张培晴<sup>1</sup>, 王训四<sup>1</sup>, 义理林<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 宁波大学高等技术研究院红外材料及器件实验室, 浙江 宁波 315211;

<sup>2</sup> 上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240

**摘要** 硫系玻璃具有较宽的红外透过范围及极高的线性和非线性折射率。综述了基于受激布里渊散射效应的硫系玻璃光器件研究进展, 以及硫系光纤和波导器件在布里渊激光器、慢光产生和微波光子滤波器等领域的应用现状, 指出了研究中存在的问题, 并展望了其发展前景。

**关键词** 非线性光学; 受激布里渊散射效应; 硫系玻璃光纤和波导; 受激布里渊散射阈值

中图分类号 O437.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.030001

## Research Progress on Chalcogenide Glass Photonic Devices Based on Stimulated Brillouin Scattering

Dai Shixun<sup>1\*</sup>, Wang Yingying<sup>2</sup>, Li Xing<sup>1</sup>, Yang Peilong<sup>1</sup>, Zhang Peiqing<sup>1</sup>,  
Wang Xunsi<sup>1</sup>, Yi Lilin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Laboratory of Infrared Materials and Devices, The Research Institute of Advanced Technologies, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China;*

<sup>2</sup> *State Key Laboratory of Advanced Optical Communication systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*

**Abstract** Chalcogenide glasses (ChGs) have a very wide range of infrared transmittance, extremely high linear and nonlinear refractive index. In this article, research progress on ChG photonic devices based on stimulated Brillouin scattering is reviewed, as well as applications of ChG fibers and waveguides in Brillouin fibers lasers, slow light generation, and microwave photonic filters. Moreover, current problems are summarized, and their potential developments are discussed.

**Key words** nonlinear optics; stimulated Brillouin scattering effect; chalcogenide glass fiber and waveguide; stimulated Brillouin scattering threshold

**OCIS codes** 190.5890; 190.4370; 060.4370; 160.2290

## 1 引言

受激布里渊散射(SBS)是光纤传输中抽运光与光纤介质的振动模式相互作用产生的一种非线性光学效应。当注入光纤中的抽运光功率大于产生SBS的阈值时,抽运光通过电致伸缩产生声波,周性声波反过来调制光纤折射率,并对抽运光产生散射使其频率下移,形成斯托克斯光输出,从而实现能量从短波长光向长波长光转换。该过程可以看成是一个抽运

光子的湮灭,同时产生一个斯托克斯光子和一个声学声子<sup>[1]</sup>。

自1972年Ippen等<sup>[2]</sup>首次在光纤中观察到SBS效应,几十年来石英光纤中SBS效应已经得到深入研究<sup>[3-10]</sup>。一方面,SBS效应阈值较低,在石英光纤中极易产生,使得大部分输入功率转移到后向斯托克斯光波,造成系统中入射光能量损耗,且其后向散射光可能对光源造成损害,从而限制进入光纤功率及系统的传输距离<sup>[11]</sup>。在目前城域网、接入

收稿日期: 2018-09-25; 修回日期: 2018-12-04; 录用日期: 2018-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(61875094)、中国博士后基金(2018M642386)、宁波大学王宽诚幸福基金

\* E-mail: daishixun@nbu.edu.cn

网以及光纤到户(HTTH)容量快速提升的情况下,必须抑制SBS效应才能确保通信系统安全稳定运行;另一方面,利用SBS效应的线宽窄,频率稳定,相干性高和增益方向敏感等优点,在布里渊光纤激光器(BFL)<sup>[12-13]</sup>和放大器<sup>[14-15]</sup>、慢光产生<sup>[16]</sup>、光滤波器<sup>[17-18]</sup>等光器件以及光纤传感<sup>[19]</sup>和光信息处理<sup>[20]</sup>等多个领域得到广泛应用。然而,普通石英光纤的SBS增益系数 $g_B$ 为 $(3\sim 5)\times 10^{-11}$  m/W<sup>[1]</sup>,增益线宽 $\Delta\nu_B$ 为10~20 MHz,长度为千米量级,抽运功率约为300 mW时,才可获得增益为20 dB,带宽为1 GHz的SBS增益谱<sup>[9]</sup>。因此,降低抽运功率以及光纤长度,需采用SBS增益系数更高的新型光纤。

硫系玻璃具有优良的透红外特性和极高的三阶非线性系数 $n_2$ (Kerr系数和拉曼增益系数较石英材料高2~3个数量级<sup>[21]</sup>),SBS增益系数也比石英材料高近2个数量级<sup>[22-23]</sup>。从2005年开始,国际知名的研究机构(日本信息通信研究所、东京大学、悉尼大学、美国海军实验室等)对硫系玻璃光纤或波导的SBS效应及其在BFL、慢光产生、微波光子滤波器等方面的应用开展了研究,取得了重要成果。本文综述了硫系玻璃光纤SBS效应,以及基于SBS效应的硫系光纤和波导器件的应用研究现状,并展望了其发展前景。

## 2 SBS 阈值理论

SBS物理过程可以经典地描述为抽运光通过电致伸缩效应产生的声波与斯托克斯光之间非线性作用的过程。入射光功率超过某一阈值后,后向散射光中的布里渊斯托克斯光分量随入射光功率的增加而急剧增加,而SBS反斯托克斯光和瑞利散射光几乎保持不变,定义此时的入射光功率为光纤SBS阈值。

对于单模石英光纤,理论估算光纤SBS阈值一般采用Smith模型和Küing模型,通常阈值估算模型为<sup>[3]</sup>

$$P_{th} = (KGA_{eff}/g_B L_{eff})(1 + \Delta\nu_s/\Delta\nu_B), \quad (1)$$

式中: $P_{th}$ 为SBS阈值; $K$ 为偏振相关因子,表示SBS散射光和入射光之间的偏振关系, $1.0 \leq K \leq 2.0$ ;当SBS的斯托克斯光的偏振态和入射光的偏振态相同时, $K = 1.0$ ;当SBS的斯托克斯光的偏振态和入射光的偏振态无关时, $K = 2.0$ ; $G$ 为阈值增益系数; $A_{eff}$ 为光纤有效模场面积; $g_B$ 为单模光纤SBS增益峰值; $L_{eff}$ 为光纤有效长度; $\Delta\nu_s$ 为入射光线宽;

$\Delta\nu_B$ 为SBS光谱线宽。

影响SBS阈值的因素很多,除了光纤增益系数、光纤长度 $L$ 和 $A_{eff}$ 以外,还有激光器波长等因素<sup>[24]</sup>,其计算公式为<sup>[10]</sup>

$$G \cong \ln(4A_{eff}v_B G_{th}^{-3/2} \pi^{1/2} / g_B k_B T \Gamma v_0 L_{eff}), \quad (2)$$

式中 $v_B$ 为布里渊频移, $G_{th}$ 为布里渊阈值系数, $k_B$ 为玻尔兹曼常数, $T$ 为绝对温度, $\Gamma$ 为声子衰减速率, $v_0$ 为抽运光波频率。从(2)式可以看出,影响 $G$ 的因素众多(包括光纤长度),但在一定条件下可近似为一常数,即 $G \approx 21$ 。如果光纤基质材料不同, $v_B$ 、 $\Delta\nu_B$ 和 $g_B$ 也有较大差异,例如:碲酸盐玻璃光纤中,SBS效应的 $v_B = 7.88$  GHz, $\Delta\nu_B = 23.6$  MHz<sup>[25]</sup>。高非线性玻璃光纤(如硫系玻璃光纤<sup>[26]</sup>、碲酸盐玻璃光纤<sup>[25]</sup>和铋酸盐玻璃光纤<sup>[27]</sup>)的 $g_B$ 值比单模石英光纤高1~2个数量级。

## 3 硫系光纤 SBS 效应研究

2004年,Ogusu等<sup>[28]</sup>根据声学材料品质因子相关参数,推演了硫系玻璃材料的 $g_B$ 计算公式,得到

$$g_B = 2\pi n^7 p_{12}^2 / c \lambda^2 \rho v_A \Delta\nu_B =$$

$$2\pi n^7 p_{12}^2 T_B / c \lambda^2 \rho v_A = (2\pi^2 / c \lambda^2) M_1 T_B, \quad (3)$$

式中 $n$ 为材料折射率, $p_{12}$ 为纵向光弹系数, $c$ 为光速, $\lambda$ 抽运波长, $\rho$ 为密度, $v_A$ 为声波在该材料中的传播速度, $\Delta\nu_B$ 为SBS增益谱半高宽,其与声波衰减时间(或声子寿命) $T_B$ 之间的关系为 $\Delta\nu_B = 1/(\pi T_B)$ , $T_B$ 通常由光谱宽度 $\Delta\nu_B$ 测量确定,可通过声波衰减系数 $\alpha_A$ 和 $v_A$ 估算,即 $T_B = 1/\alpha_A v_A$ , $M_1$ 为衡量声光器件效率的品质因子。

利用(3)式计算两种典型硫系玻璃 $As_2S_3$ 和 $As_2Se_3$ 在1.06  $\mu$ m波长下的SBS增益系数 $g_B$ ,相关参数如表1所示,得到 $g_B$ 分别为 $48.2 \times 10^{-11}$  m/W和 $53.2 \times 10^{-11}$  m/W,比石英玻璃( $2.24 \times 10^{-11}$  m/W)分别高22和24倍;Sonehara等<sup>[29]</sup>采用自行搭建装置并利用1.064  $\mu$ m的Nd:YAG激光测量石英玻璃、碲酸盐玻璃、 $As_2Se_3$ 玻璃和铋酸盐玻璃的SBS光谱,实验测得其SBS增益线宽 $\Delta\nu_B$ 分别为22.67 MHz、25.81 MHz、27.69 MHz、37.12 MHz,说明折射率高的玻璃 $\Delta\nu_B$ 值也较大。

光纤具有波导结构特性,因此硫系光纤与块状玻璃的 $g_B$ 存在一定差异。2005年,Abidin<sup>[22]</sup>首次在长度为4.92 m的单模 $As_2Se_3$ 硫系光纤(纤芯直径 $d = 6$   $\mu$ m,数值孔径 $NA = 0.18$ )中观察到了强

表1 计算  $As_2S_3$  和  $As_2Se_3$  硫系玻璃 SBS 增益系数时的相关参数

Table 1 Relevant parameters used to calculate SBS gain coefficients of  $As_2S_3$  and  $As_2Se_3$  glasses

Glass composition	$n$	$\rho / (g \cdot cm^{-3})$	$v_A / (m \cdot s^{-1})$	$p_{12}$	$T_B / ns$
$As_2S_3$	2.48	3.2	2600	0.299	1.33
$As_2Se_3$	2.81	4.64	2250	0.266	0.969

SBS 效应,其测量装置原理如图 1 所示。 $As_2Se_3$  光纤与石英光纤采用对接耦合方式,在不同功率的  $1.5 \mu m$  激光抽运下, $As_2Se_3$  光纤的后向散射光谱如图 2 所示。 $\nu_B$  和  $\Delta\nu_B$  分别为 7.95 GHz 和 13.2 MHz,  $g_B = 6.0 \times 10^{-9} m/W$ ,该值为单模石英光纤 134 倍。2006 年, Song 等<sup>[16]</sup> 采用功率 60 mW 的  $1.56 \mu m$  LD 作为抽运源,在 5 m 长的商用  $As_2Se_3$  单模光纤(纤芯直径  $d = 6 \mu m$ ,归一化频率  $V@1560 nm = 2.17$ )中实现了 43 dB 的 SBS 增益,  $\nu_B = 7.968 GHz$ ,  $\Delta\nu_B = 13 MHz$ ;同年, Florea 等<sup>[26]</sup> 研究了单模  $As_2S_3$  硫系光纤( $d = 4.2 \mu m, NA = 0.33, V = 2.8$ )中的 SBS 效应及阈值,测得  $As_2S_3$  光纤  $P_{th} = 27 \pm 3 mW$ ,  $g_B = (3.9 \pm 0.4) \times 10^{-9} m/W$ , 其为单模  $As_2Se_3$  和石英光纤的 2.7 和 140 倍。因此,可认为采用更小纤芯,更低损耗的  $As_2S_3$  光纤能获得更大的 SBS 增益系数。

过缩小拉锥光纤的腰锥直径降低光纤  $A_{eff}$ ,可以降低 SBS 效应所需的阈值功率和光纤长度,也可控制 SBS 频移大小。2014 年, Beugnot 等<sup>[30]</sup> 采用  $1.55 \mu m$  的 DFB 激光抽运纤芯(直径  $0.7 \mu m$ ,长度 13 cm)的  $As_2Se_3$ -PMMA 拉锥光纤,实现了  $\nu_B = 6.87 GHz$ ,  $\Delta\nu_B = 100 MHz$  的 SBS 增益谱,  $P_{th} = 25.1 dBm$ 。实验发现,随着  $As_2Se_3$  拉锥光纤直径的增大,  $\nu_B$  增大,  $\Delta\nu_B$  减小,当拉锥光纤的纤芯直径为  $1 \mu m$  时,  $\nu_B = 7.53 GHz$ ,  $\Delta\nu_B = 64 MHz$ 。

与普通阶跃型光纤相比,光子晶体光纤(PCF)可灵活调控新颖结构,能实现更强的 SBS 效应。研究者们设计了具有更小  $A_{eff}$  值的单模硫系 PCF,使其三阶非线性系数增加,以期获得更高的 SBS 增益特性。Fortier 等<sup>[31]</sup> 首次报道了基于  $Ge_{15}Sb_{20}S_{65}$  玻璃的六角形硫系光子晶体光纤[图 3(a)]SBS 特性,其参数为:空气孔间距  $\Lambda = 13.3 \mu m$ ,空气孔直径与孔间距之比  $d_{air-hole} / \Lambda = 0.3$ ,模场直径(MFD)为  $8 \mu m$ ,  $A_{eff} = 50 \mu m^2$ ,损耗  $\alpha = 5.5 dB/m$ ;对 2 m 长的光纤进行实验,得到  $\nu_B = 8.2 GHz$ ,  $\Delta\nu_B = 64 MHz$ ,  $g_B = 8.10 \times 10^{-9} m/W$ (该值为石英光纤的 184 倍); Tow 等<sup>[32]</sup> 报道了基于  $As_{38}Se_{62}$  玻璃的悬吊芯硫系光纤[图 3(b)]SBS 特性,拉制的光纤参数为:外径  $d_{outer-clad} = 240 \mu m, d = 5 \mu m, A_{eff} = 13 \mu m^2$ ,  $\alpha = 1 dB/m$ ;对 3 m 长光纤进行实验,测量结果为  $\nu_B = 7.95 GHz$ ,  $\Delta\nu_B = 14.2 MHz$ ,  $g_B = 5.75 \times 10^{-9} m/W, P_{th} = 45 mW$ 。

另外,研究者开展了新型结构硫系 PCF 光纤 SBS 特性数值仿真研究。2011 年, Cherif 等<sup>[33]</sup> 设计了一种三层空气环绕的三角形结构的  $As_2Se_3$  PCF 光纤,空气孔直径  $d_{air-hole} = 1.26 \mu m$ ,孔间距  $\Lambda = 1.77 \mu m, L = 1 m, n_2 = 2.3 \times 10^{-17} m^2 W^{-1}$ ,数值仿真结果为  $P_{th} = 36 mW, g_B = 5.59 \times 10^{-9} m/W, \nu_B = 8.08 GHz$ ;随后,其设计了一种三层空气孔环绕的三角形结构的小纤芯  $As_2Se_3$  PCF 光纤,空气孔  $d_{air-hole} = 0.5 \mu m, \Lambda = 2 \mu m$ ,数值仿真结果为  $g_B = 5.91 \times 10^{-9} m/W, \nu_B = 8.19 GHz$ ,小纤芯 PCF 光纤的 SBS 增益谱线呈现高  $g_B$  和多峰行为,这可归结于减小纤芯直径时的高阶声模作用;2015 年, Abidi 等<sup>[34]</sup> 设计了一种椭圆形三层空气孔环绕的  $As_2Se_3$  PCF 光纤,由于椭圆空气孔中光学和声学模式相互作用增强,其布里渊增益谱出现多峰行为,当气孔椭圆率  $\eta$ (椭圆孔的主轴与次轴长度之比)从 1 增加到 3 时,  $g_B$  从  $1.74 \times 10^{-10} m/W$  增加到  $4.08 \times 10^{-9} m/W$ ;

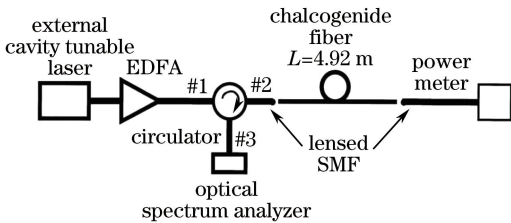


图1  $As_2Se_3$  硫系光纤 SBS 效应的测量实验装置图  
Fig. 1 Experimental setup used for observation of SBS in  $As_2Se_3$  chalcogenide fiber

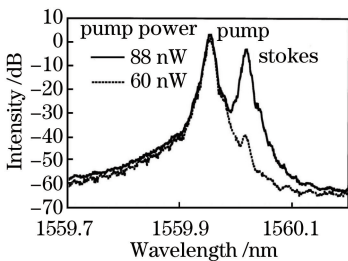


图2 不同功率激光抽运下  $As_2Se_3$  光纤后向散射光谱  
Fig. 2 Output optical spectra from  $As_2Se_3$  fiber in backward direction for different pump power

光纤拉锥是一种重要的光纤后处理技术,其通



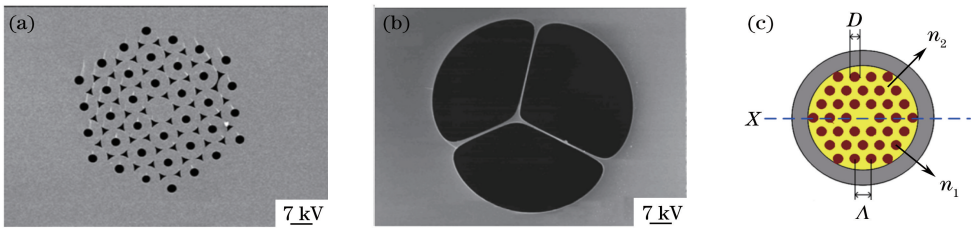


图3 硫系微结构光纤端面图。(a)三角形结构硫系 PCF;(b)悬吊芯硫系 PCF;(c)全固态硫系-碲化物光子带隙光纤  
Fig. 3 Cross sections of chalcogenide micro-structured fibers. (a) Chalcogenide glass PCF with triangular lattice cladding; (b) suspended-core chalcogenide glass PCF; (c) all-solid-state chalcogenide-tellurite photonic bandgap fiber

2017年,华中科技大学 Chen 等<sup>[35]</sup>设计了一种双包层六边形(内外两层空气孔直径不同)As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> PCF 光纤,数值仿真结果发现,当两种空气孔直径  $d_{air-hole1}$  和  $d_{air-hole2}$  分别为 0.8 μm 和 1.2 μm,  $\Delta = 2 \mu\text{m}$  时,  $g_B = 5.51 \times 10^{-9} \text{ m/W}$ ,  $\nu_B = 8.12 \text{ GHz}$ ; 2017年, Xu 等<sup>[36]</sup>数值仿真了四孔悬吊芯 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 光纤在空气孔分别填充不同物质(空气、三氯甲烷、酒精、水)情况下的 SBS 光场和声场特性,通过改变空气孔直径和内孔填充不同折射率物质可以调控光纤中声场和光场的相互作用强度,从而实现调控 SBS 效应大小。

此外,通过全固态光子带隙(PBG)型 PCF 结构设计,可以抑制硫系光纤 SBS 效应,提升 SBS 阈值。2012年, Cheng 等<sup>[37]</sup>设计了一种硫系玻璃(As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)/碲酸盐玻璃(TeO<sub>2</sub>-ZnO-Li<sub>2</sub>O-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)杂化的全固态 PBG 光纤[图 3(c)],如果包层区域的有效声速比纤芯区域更快,声波将通过全内反射机理被限于纤芯层,否则,声波将被声波带隙机制所限制,通过这种机理设计相应的结构可以降低光声效应,有效降低  $g_B$  值 4 个数量级(达  $10^{-13} \text{ m/W}$ )。

#### 4 基于 SBS 效应的硫系光纤器件应用研究

在 BFL 应用研究方面,由于硫系光纤具有高 SBS 增益系数,且  $L_{eff}$  和  $A_{eff}$  两个参数易调节,若将其作为增益介质,可以减少谐振腔所需腔长,有利于器件小型化。此外,硫系光纤还可以降低系统功耗。2006年, Abedin<sup>[23]</sup>首次实现了基于 As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 硫系单模光纤的 1.56 μm 单纵模 BFL,并测量了该光纤的 SBS 增益特性,其测量装置结构如图 4 所示,采用 As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 光纤( $d = 6 \mu\text{m}$ ,  $N_A = 0.18$ ,  $A_{eff} = 39 \mu\text{m}^2$ ,  $g_B = 6 \times 10^{-9} \text{ m/W}$ ,  $L = 4.9 \text{ m}$ ),在信号光调制频率为 7.958 GHz 时,在 68 mW 激光抽运下产生了 42 dB 的 SBS 增益;利用该段光纤构建的紧凑环形腔 BFL,当抽运功率为 92 mW 时,获得了 21.4 mW

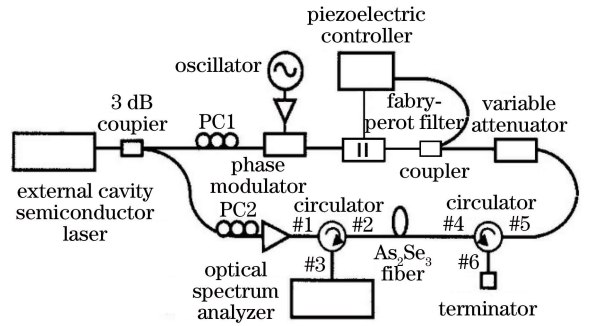


图4 布里渊增益特性的测量装置图  
Fig. 4 Experimental setup used for measuring Brillouin gain

的布里渊激光输出,功率阈值为 35 mW,斜率效率为 38%; 2012年, Tow 等<sup>[38]</sup>首次报道了一种由 As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 悬吊芯微结构光纤构建的 BFL,其装置结构如图 5 所示,抽运源为 1 kHz 的窄线宽激光器,以一段长 3 m 的硫系光纤为主构成环形腔,实现了 1.55 μm 波段的低阈值(22 mW)布里渊激光输出,斜率效率为 26%,最大输出功率为 6.5 mW,输出激光线宽小于 4 kHz,信噪比低于抽运光 6 dB;随后,该课题组<sup>[39]</sup>采用一段长 3 m 的 Ge<sub>10</sub>As<sub>22</sub>Se<sub>68</sub> 硫系 PCF 光纤( $d_{outer-clad} = 140 \mu\text{m}$ ,  $d = 3.8 \mu\text{m}$ ,  $\alpha = 0.65 \text{ dB/m}$ ,  $A_{eff} = 8 \mu\text{m}^2$ )构成的布里渊光纤环形激光器,测得  $g_B = 3.3 \times 10^{-9} \text{ m/W}$ ,  $\nu_B = 7.25 \text{ GHz}$ ,  $\Delta\nu_B = 17 \text{ MHz}$ ,该 BFL 在不需要主动控制腔体的情

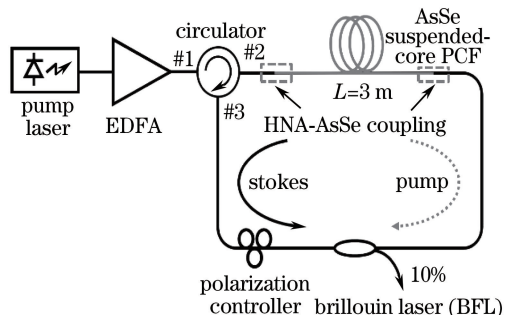


图5 布里渊光纤激光器装置的原理图  
Fig. 5 Experimental setup of Brillouin fiber laser cavity



况下,实现了  $1.55 \mu\text{m}$  波段更低阈值( $6 \text{ mW}$ )布里渊激光输出,而且可作为低通滤波器,斯托克斯分量频率噪声降低了  $16 \text{ dB}$ ,输出激光线宽仅为抽运光线宽的  $1/8$ ,这种线宽压缩效应可通过减少谐振腔体中总损耗进一步增加,或使用具有更高耦合效率的耦合器增加。

中红外  $2 \mu\text{m}$  波段的硫系 BFL 随后也相继报道。2014 年, Hu 等<sup>[12]</sup>首次利用硫系光纤搭建了  $2 \mu\text{m}$  波段 BFL,其装置结构如图 6 所示,采用工作波长为  $1952 \text{ nm}$ ,功率为  $0.7 \text{ mW}$  的 CW LD 作为种子源,经由两个级联的掺铊光纤放大器(TDFA)放大,再通过光环行器的 1 号端口进入,2 号端口出射后进入由  $1.5 \text{ m}$  长  $\text{As}_{38}\text{Se}_{62}$  悬吊芯光纤( $d = 4.5 \mu\text{m}$ ,  $A_{\text{eff}} = 8 \mu\text{m}^2$ )构成的谐振腔,最终在输出端得到如图 7 所示的斯托克斯光输出。整个系统中石英光纤与硫系光纤的连接方法为:在单模石英光纤上熔接一小段高  $N_A$  值的光纤(UHNA1, Nufern, 美国),将 UHNA 光纤与  $\text{As}_{38}\text{Se}_{62}$  光纤对接耦合,每个端面损耗耦合为  $3.7 \text{ dB}$ ,插入损耗为  $3.3 \text{ dB}$ 。由于谐振腔中的反馈机制,其  $P_{\text{th}}$  值( $52 \text{ mW}$ )约为  $\text{As}_{38}\text{Se}_{62}$  悬吊芯光纤 SBS 阈值( $91.4 \text{ mW}$ )的  $60\%$ 。与单模石英光纤进行对比实验发现,基于  $140 \text{ m}$  石英单模光纤的激光器阈值为  $340 \text{ mW}$ ,约为前者的  $6.5$  倍,而前者使用的增益介质长度比后者小两个数量级,这主要归功于采用的悬吊芯  $\text{As}_{38}\text{Se}_{62}$  光纤具有高  $g_B$  值(比石英高两个数量级)和低  $A_{\text{eff}}$  值(约为单模石英光纤的  $1/8$ )。

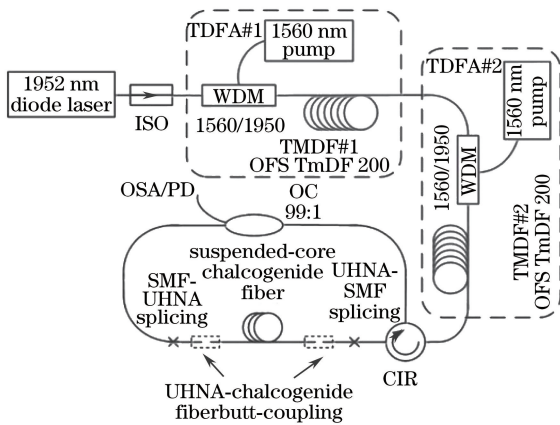


图 6  $2 \mu\text{m}$  BFL 装置图  
Fig. 6 Setup of  $2 \mu\text{m}$  BFL

在慢光产生方面,传统的石英光纤作为慢光介质,延迟效率较低,对光纤长度和抽运功率要求较高。将高非线性硫系光纤作为慢光介质应用于慢光产生系统,可以有效提高系统的延迟效率。2006

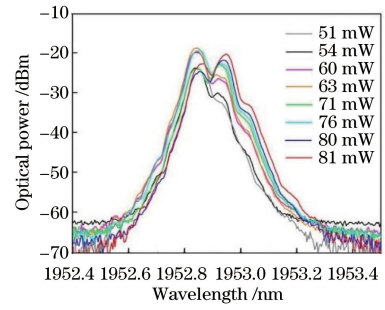


图 7 不同抽运光功率下的斯托克斯激光器输出

年, Song 等<sup>[16]</sup>利用一段长  $5 \text{ m}$  的单模  $\text{As}_2\text{S}_3$  光纤作为慢光介质构建了光延迟装置,如图 8 所示,在抽运功率仅为  $60 \text{ mW}$  的情况下,利用工作波长为  $1560 \text{ nm}$  的  $50 \text{ ns}$  高斯脉冲信号获得了  $43 \text{ dB}$  的 SBS 增益,脉冲延迟  $37 \text{ ns}$ ,延迟效率为  $0.82 \text{ ns/dB}$ ,如图 9 所示;2009 年, Florea 等<sup>[40]</sup>在一段  $10 \text{ m}$  长的单模  $\text{As}_2\text{S}_3$  光纤中,仅用  $30 \text{ mW}$  抽运功率对工作波长为  $1548 \text{ nm}$  的  $40 \text{ ns}$  正弦脉冲信号实现了  $19 \text{ ns}$  延迟;2016 年, Sinha 等<sup>[41]</sup>设计了一种基于  $\text{As}_2\text{Se}_3$  玻璃的双包层单模 PCF 光纤,光纤内包层结构为三层空气环绕,理论仿真结果表明,当  $\Lambda = 2 \mu\text{m}$ ,  $d_{\text{air-hole}}/\Lambda = 0.4$ ,抽运功率为  $100 \text{ mW}$  时,在

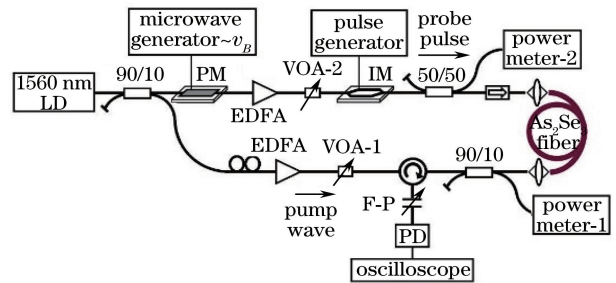


图 8  $\text{As}_2\text{Se}_3$  硫系光纤构建的光延迟装置  
Fig. 8 Setup for optical delay experiment using  $\text{As}_2\text{Se}_3$  chalcogenide fiber

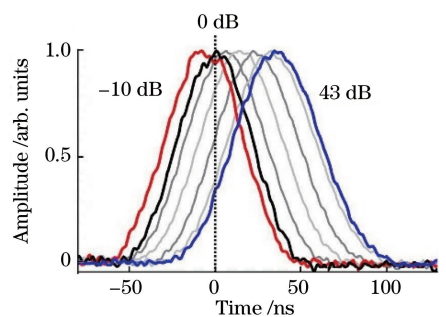


图 9 不同布里渊增益下的脉冲时域波形  
Fig. 9 Time domain waveforms of probe pulses for different Brillouin gains

1 m 长的光纤中可将光脉冲延迟 137 ns。

此外,利用硫系光纤的较高 SBS 增益特性,还可将其应用于布里渊频率梳领域。2015 年, Büttner 等<sup>[42]</sup>利用长 38 cm 的单模 As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 光纤构成法布里-珀罗腔,抽运源采用 500 ns、1550 nm,平均功率小于 10 mW 的准连续光源,利用 SBS 和四波混频(FWM)在谐振腔中的相互作用,在无额外锁相元件辅助下,实现了重复频率为 8 GHz 稳定的 40 ps 脉冲序列。

### 5 基于 SBS 效应的硫系波导器件

与光纤相比,波导结构可以制备尺寸更小,  $A_{\text{eff}}$  值更低的光器件。澳大利亚在基于 SBS 效应的硫系波导器件研究方面取得了重要进展。2011 年, Pant 等<sup>[43]</sup>首次在截面尺寸为  $4 \mu\text{m} \times 850 \text{ nm}$ , 长度为 7 cm 的 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 硫系波导中获得了 SBS 增益谱,当采用 300 mW 的 1545 nm 连续 LD 激光抽运时,得到  $\nu_B = 7.7 \text{ GHz}$ ,  $\Delta\nu_B = 34 \text{ MHz}$ , 增益为 16 dB 的 SBS 增益谱, 计算得到 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 波导  $g_B = 0.74 \times 10^{-9} \text{ m/W}$ , SBS 功率阈值为 1.73 W; 同年, 该课题组报道了基于 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 波导的级联布里渊多波长激光器, 装置原理如图 10 所示<sup>[44]</sup>, 采用脉宽为 2  $\mu\text{s}$  的 1.5  $\mu\text{m}$  激光器作为抽运源, 一块 4 cm 长的 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 波导 ( $A_{\text{eff}} = 2.3 \mu\text{m}^2$ ) 同时作为增益介质和法布里珀罗线性谐振腔, 当抽运脉冲峰值功率为 1.34 W 时, 观察到了 3 级斯托克斯谱线, 如图 11 所示; 2012 年, Levy 等<sup>[8]</sup>通过热蒸发沉积薄膜, 采用 810 nm 激光直写方法制备了截面尺寸为  $4 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$  的 1 cm 长度 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 波导, 在该波导中实现 SBS 频移  $\nu_B$  和增益线宽  $\Delta\nu_B$  分别为 7.5 MHz 和 200 MHz, 所对应抽运功率为 45 mW; 2013 年,

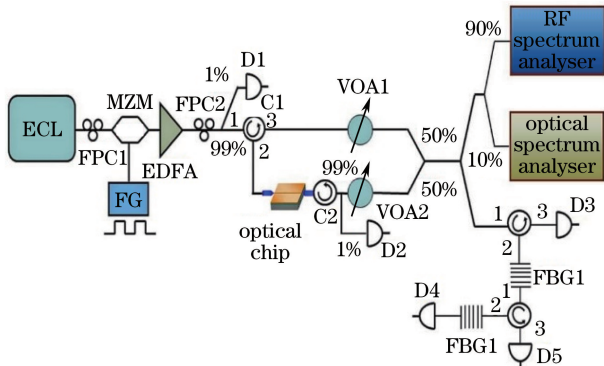


图 10 片上级联 SBS 产生过程的实验装置

Fig. 10 Experimental setup for characterizing on-chip cascaded SBS process

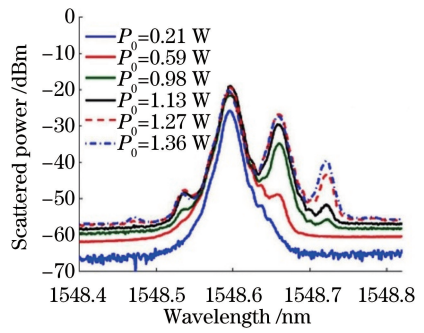


图 11 不同峰值抽运功率下的 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 片上的布里渊散射光谱  
Fig. 11 Brillouin-scattered spectra in As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> chip at different peak pump powers

Kabakova 等<sup>[45]</sup>报道了基于硫系波导的窄线宽布里渊激光器, 采用一块 7 cm 长的 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 波导 (宽  $4 \mu\text{m}$ ,  $A_{\text{eff}} = 2.3 \mu\text{m}^2$ ) 作为增益介质, 得到激光输出的阈值为 360 mW, 斜率效率为 30%, 输出光线宽为 100 kHz, 仅为抽运光线宽 (1.55 MHz) 的 1/15。

具有 GHz 重复频率的紧凑光频梳在一些重要领域极具应用前景, 例如全光任意波形产生和直接频率梳光谱学等, 而采用具有高集成度的片上集成技术是获得光频梳的主要手段之一。2014 年, Büttner 等<sup>[46]</sup>在尺寸为  $3 \mu\text{m} \times 850 \text{ nm} \times 6.5 \text{ cm}$  的 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 硫系玻璃脊型波导谐振腔中产生了相位锁定的 7.5 GHz 重复频率光频梳, 如图 12 所示。该方案在包含布拉格光栅的片上法布里-珀罗波导谐振腔中利用 SBS 和 Kerr 非线性 FWM 相互作用产生布里渊光频梳, 实时测量

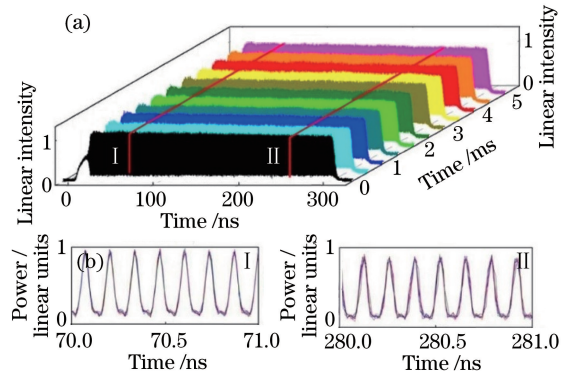


图 12 布里渊频率梳时域测量结果。(a) 11 个 300 ns 抽运脉冲以 0.5 ms 延迟耦合入波导中获得的脉冲输出; (b) 70 ns 和 (b2) 280 ns 处宽度为 1 ns 的输出脉冲的放大图

Fig. 12 Temporal measurements of the Brillouin frequency comb. (a) Eleven output pulses generated by coupling eleven 300 ns input pump pulses into the waveguide with 0.5 ms delay; 1 ns long zoomed-in section at (b1) 70 ns and (b2) 280 ns of all 11 traces shown in Fig. (a)

结果表明,该光频梳相位锁定,抽运脉冲内频率梳重复频率的啁啾,该结果为最终实现 GHz 重复频率的集成光频梳奠定了重要基础。

近年来,微波光子滤波器(MPF)已成为微波学和光学交叉领域的研究热点<sup>[47-51]</sup>,其将微波信号调制到光域中,处理后的信号经过光电探测器转换为电信号,从而实现所需频率信号的选择或抑制,其优点是滤波频段高、体积小、损耗低、成本小、抗电磁干扰强、宽带宽、低色散以及高容量等,可以实现一些电子微波滤波器不能实现的功能。而基于 SBS 效应的 MPF 不仅拥有可调谐和可重构特性,且其具有阈值低,调谐范围大和系统稳定性好等优点,已引起广泛关注。2012 年,Byrnes 等<sup>[52]</sup>报道了一种基于  $As_2S_3$  波导光子芯片的 MPF,其实验装置如图 13 所示,采用的  $As_2S_3$  芯片尺寸为  $4 \mu m \times 850 nm \times 6.5 cm$ ,实验结果如图 14 所示,该微波光子滤波器在  $2 \sim 12 GHz$  的调谐范围内,2 dB 带宽可稳定在  $23 \pm 2 MHz$ ,幅值稳定在  $20 \pm 2 dB$ ,品质因数

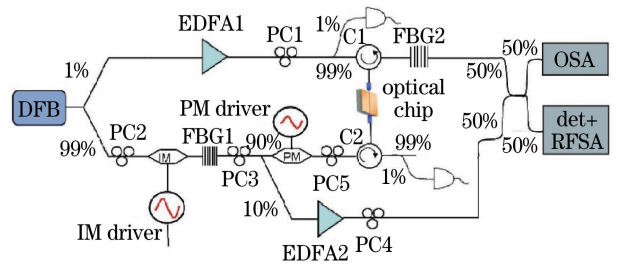


图 13 基于  $As_2S_3$  光子芯片的 MPF 装置

Fig. 13 Setup of MPF based on  $As_2S_3$  photonic chip

$Q$  为 520,将抽运光从单抽运光调节到双抽运光,可实现 MPF 的 3 dB 带宽重构范围  $20 \sim 40 MHz$ ,形状因子从 3.5 到 2;2014 年,该课题组又在  $As_2S_3$  芯片中实现了基于 SBS 的可调谐微波光子陷波滤波器(MPNF)<sup>[53]</sup>,装置原理如图 15 所示,通过非抑制载波的单边带调制作为反斯托克斯光,并和抽运光产生损耗谱,载波和单边带的混频形成陷波,其 3 dB 和 6 dB 带宽分别为 126 MHz 和 78 MHz,可调谐范围为  $2 \sim 8 GHz$ 。

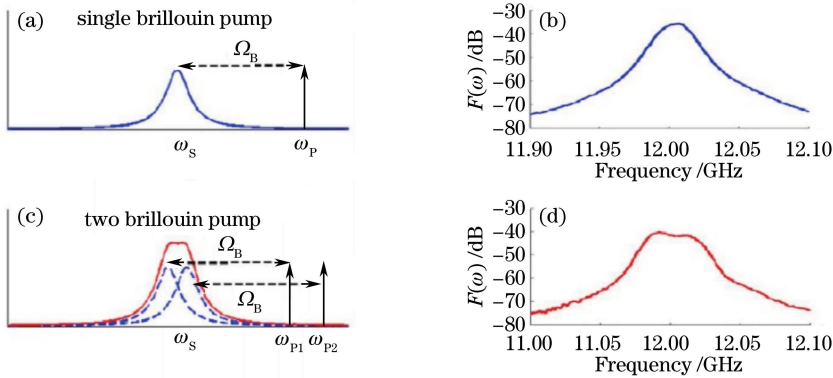


图 14 理论仿真和实验测量结果。(a)单抽运和(c)双抽运下的 MPF 理论滤波响应曲线;

(b)单抽运和(d)双抽运下实验测量得的 MPF 曲线

Fig. 14 Theoretical simulation and experimental results. Theoretical filter response for (a) single and (c) two pumps demonstrating MPF profile reshaping (flat top); measured MPF profiles for (b) single pump and (d) dual pump

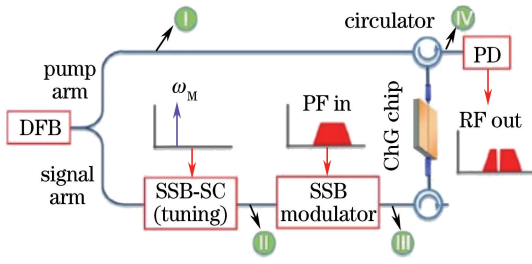


图 15 可调谐 MPNF 装置图

Fig. 15 Schematic of tunable MPNF

2014 年,Pant 等<sup>[47]</sup>综述了片上受激布里渊散射在微波信号处理与产生的研究进展,讨论了单通道和谐振腔几何型式实现片上布里渊散射所需的几

种关键材料和器件特性,实验证明了采用硫系芯片可获得减缓因子  $\Delta n_g = 130$  的 SBS 慢光,其可导致从  $0 \sim 23 ns$  的连续可调延迟;采用新方案可在几 mW 抽运功率下实现高效、超高抑制 ( $> 50 dB$ ) 的片上微波光子陷波滤波器;2016 年,Merklein 等<sup>[48]</sup>指出硫系片上 SBS 为极具发展前景的微波光子滤波器,但需要开发新型硫系基质材料以更好利用高 SBS 效应。

## 6 存在的问题

从国内外研究进展可以看出,基于 SBS 效应的硫系光纤和波导器件研究已经取得了重要进展。但



还存在以下几点明显不足:1)硫系光纤普遍基于  $As_2S_3$  或  $As_2Se_3$  阶跃型光纤,光纤的  $d$ 、 $NA$  以及 SBS 增益系数调控范围均有限,且关于硫系玻璃组成和光纤结构对 SBS 性能影响等方面的研究鲜有报道;2)硫系玻璃体系众多,可通过玻璃组成与性能调控,设计具有更高 SBS 系数的新基质材料,进一步对硫系光纤调控芯包折射率、有效模场面积和光纤长度等参数,获得更低抽运阈值功率,实现更高的 SBS 增益,以满足基于 SBS 效应的光纤器件小型化的需求;3)在 BFL 结构方面,硫系光纤与石英光纤基本采用透镜对接或胶水粘结等方式进行耦合,两种光纤具有较大的折射率差和较大的菲涅耳反射系数,会导致强烈的端面反射,不仅提升了 SBS 激光的阈值功率,而且不利于整个器件的全光纤化,另外,胶水粘结的牢固性难于保证,器件运行过程中稳定性也存在问题,因此,需要探索熔接方式解决有效耦合问题,以降低阈值功率。

## 7 结束语

近年来,基于 SBS 效应的硫系光纤和波导器件在低阈值 BFL、慢光产生和微波光子滤波器等领域的应用研究取得了长足进步,但总体而言仍处于基础研究和应用试验的起步阶段。作为光子器件中的新成员和有益补充,随着相关制作工艺、传输理论、性能测试和器件耦合技术的不断改进,相信未来在一些特殊应用领域必将有其实际的用武之地。

中红外  $2\ \mu\text{m}$  波段作为人眼安全波段,对大气气体分子的强烈吸收特性,可在医疗手术、大气中传感和气象监测等领域具有重要应用,也将是下一代通讯网络的潜在工作波段。硫系玻璃具有优良的透红外特性和极高的非线性系数,是中红外波段理想的非线性光学介质,而基于 SBS 效应的硫系光器件研究也会推动  $2\ \mu\text{m}$  波段光器件的发展。

## 参 考 文 献

- [1] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics[J]. Cambridge: Academic Press, 2007.
- [2] Ippen E P, Stolen R H. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers [J]. Applied Physics Letters, 1972, 21(11): 539-541.
- [3] Smith R G. Optical power handling capacity of low loss optical fibers as determined by stimulated Raman and Brillouin scattering[J]. Applied Optics, 1972, 11(11): 2489-2494.
- [4] Tkach R W, Chraplyvy A R, Derosier R M. Spontaneous Brillouin scattering for single-mode optical-fibre characterisation[J]. Electronics Letters, 1986, 22(19): 1011-1013.
- [5] Ferreira M F. Impact of stimulated Brillouin scattering in optical fibers with distributed gain[J]. Journal of Lightwave Technology, 1995, 13 (8): 1692-1697.
- [6] Yeniay A, Delavaux J M, Toulouse J. Spontaneous and stimulated Brillouin scattering gain spectra in optical fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 20(8): 1425-1432.
- [7] Mountfort F H, Yoo S, Boyland A J, *et al.* Temperature effect on the Brillouin gain spectra of highly doped aluminosilicate fibers [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and 12<sup>th</sup> European Quantum Electronics Conference, 2011: CE\_P23.
- [8] Levy S, Lyubin V, Klebanov M, *et al.* Stimulated Brillouin scattering amplification in centimeter-long directly written chalcogenide waveguides[J]. Optics Letters, 2012, 37(24): 5112-5114.
- [9] Kobayakov A, Sauer M, Chowdhury D. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers[J]. Advances in Optics and Photonics, 2010, 2(1): 1-59.
- [10] Shen Y C, Song M P, Zhang X M, *et al.* Analysis and measurement of stimulated Brillouin scattering threshold in single mode fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(4): 497-500.
- 沈一春, 宋牟平, 章献民, 等. 单模光纤中受激布里渊散射阈值研究[J]. 中国激光, 2005, 32(4): 497-500.
- [11] Chraplyvy A R. Limitations on lightwave communications imposed by optical-fiber nonlinearities[J]. Journal of Lightwave Technology, 1990, 8(10): 1548-1557.
- [12] Hu K, Kabakova I V, Büttner T F S, *et al.* Low-threshold Brillouin laser at  $2\ \mu\text{m}$  based on suspended-core chalcogenide fiber[J]. Optics Letters, 2014, 39 (16): 4651-4654.
- [13] Geng J H, Staines S, Wang Z L, *et al.* Highly stable low-noise Brillouin fiber laser with ultranarrow spectral linewidth [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(17): 1813-1815.
- [14] Philippov V, Codemard C, Jeong Y, *et al.* High-energy in-fiber pulse amplification for coherent lidar applications [J]. Optics Letters, 2004, 29 (22): 2590-2592.
- [15] Zhan L, Gu Z C, Xing L, *et al.* Advances of fiber

- Brillouin lasers and amplifiers and their applications [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(4): 901-911.
- 詹黎, 顾照昶, 邢亮, 等. 光纤布里渊激光器和放大器的研究进展及其应用[J]. 中国激光, 2010, 37(4): 901-911.
- [16] Song K Y, Abedin K S, Hotate K, *et al.* Highly efficient Brillouin slow and fast light using  $\text{As}_2\text{Se}_3$  chalcogenide fiber [J]. Optics Express, 2006, 14(13): 5860-5865.
- [17] Marpaung D, Morrison B, Pagani M, *et al.* Low-power, chip-based stimulated Brillouin scattering microwave photonic filter with ultrahigh selectivity [J]. Optica, 2015, 2(2): 76-83.
- [18] Wei W, Yi L L, Jaouën Y, *et al.* Bandwidth-tunable narrowband rectangular optical filter based on stimulated Brillouin scattering in optical fiber [J]. Optics Express, 2014, 22(19): 23249-23260.
- [19] Korb C L, Gentry B M, Li S X, *et al.* Theory of the double-edge technique for Doppler lidar wind measurement[J]. Applied Optics, 1998, 37(15): 3097-3104.
- [20] Chin S, Thévenaz L, Sancho J, *et al.* Broadband true time delay for microwave signal processing, using slow light based on stimulated Brillouin scattering in optical fibers[J]. Optics Express, 2010, 18(21): 22599-22613.
- [21] Thielen P A, Shaw L B, Pureza P C, *et al.* Small-core As-Se fiber for Raman amplification[J]. Optics Letters, 2003, 28(16): 1406-1408.
- [22] Abedin K S. Observation of strong stimulated Brillouin scattering in single-mode  $\text{As}_2\text{Se}_3$  chalcogenide fiber [J]. Optics Express, 2005, 13(25): 10266-10271.
- [23] Abedin K S. Single-frequency Brillouin lasing using single-mode  $\text{As}_2\text{Se}_3$  chalcogenide fiber [J]. Optics Express, 2006, 14(9): 4037-4042.
- [24] Wang Z B, Shao B B, Zhang L, *et al.* Analysis and measurement of stimulated Brillouin scattering threshold in fiber [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(9): 090603.
- 王振宝, 邵碧波, 张磊, 等. 光纤受激布里渊散射阈值分析与实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(9): 090603.
- [25] Abedin K S. Stimulated Brillouin scattering in single-mode tellurite glass fiber[J]. Optics Express, 2006, 14(24): 11766-11772.
- [26] Florea C, Bashkansky M, Dutton Z, *et al.* Stimulated Brillouin scattering in single-mode  $\text{As}_2\text{S}_3$  and  $\text{As}_2\text{Se}_3$  chalcogenide fibers [J]. Optics Express, 2006, 14(25): 12063-12070.
- [27] Ahmad H, Shahi S, Harun S W. Bismuth-based erbium-doped fiber as a gain medium for L-band amplification and Brillouin fiber laser [J]. Laser Physics, 2010, 20(3): 716-719.
- [28] Ogusu K, Li H P, Kitao M. Brillouin-gain coefficients of chalcogenide glasses[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2004, 21(7): 1302-1304.
- [29] Sonehara T, Kaminaga H, Tatsu E, *et al.* Frequency-modulated stimulated Brillouin spectroscopy in high-refractive-index glasses [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2008, 354(15/16): 1768-1773.
- [30] Beugnot J C, Ahmad R, Rochette M, *et al.* Reduction and control of stimulated Brillouin scattering in polymer-coated chalcogenide optical microwires[J]. Optics Letters, 2014, 39(3): 482-485.
- [31] Fortier C, Fatome J, Pitois S, *et al.* Experimental investigation of Brillouin and Raman scattering in a 2SG sulfide glass microstructured chalcogenide fiber [J]. Optics Express, 2008, 16(13): 9398-9404.
- [32] Tow K H, LÉguillon Y, Besnard P, *et al.* Brillouin fiber laser using  $\text{As}_{38}\text{Se}_{62}$  suspended-core chalcogenide fiber[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8426: 842611.
- [33] Cherif R, Salem A B, Zghal M. Full modal analysis of the stimulated Brillouin scattering in  $\text{As}_2\text{Se}_3$  chalcogenide photonic crystal fiber[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8073: 80732R.
- [34] Abidi I, Cherif R, Zghal M. Enhanced stimulated Brillouin scattering in chalcogenide elliptical photonic crystal fibres[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9347: 934719.
- [35] Chen X, Xia L, Li W, *et al.* Simulation of Brillouin gain properties in a double-clad  $\text{As}_2\text{Se}_3$  chalcogenide photonic crystal fiber [J]. Chinese Optics Letters, 2017, 15(4): 042901.
- [36] Xu Q, Gao W Q, Li X, *et al.* Investigation on optical and acoustic fields of stimulated Brillouin scattering in  $\text{As}_2\text{S}_3$  suspended-core microstructured optical fibers[J]. Optik, 2017, 133: 51-59.
- [37] Cheng T L, Liao M S, Gao W Q, *et al.* Suppression of stimulated Brillouin scattering in all-solid chalcogenide-tellurite photonic bandgap fiber [J]. Optics Express, 2012, 20(27): 28846-28854.

- [38] Tow K H, Léguillon Y, Besnard P, *et al.* Relative intensity noise and frequency noise of a compact Brillouin laser made of  $\text{As}_{38}\text{Se}_{62}$  suspended-core chalcogenide fiber[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(7): 1157-1159.
- [39] Tow K H, Leguillon Y, Fresnel S, *et al.* Toward more coherent sources using a microstructured chalcogenide Brillouin fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(3): 238-241.
- [40] Florea C, Bashkansky M, Sanghera J, *et al.* Slow-light generation through Brillouin scattering in  $\text{As}_2\text{S}_3$  fibers[J]. *Optical Materials*, 2009, 32(2): 358-361.
- [41] Sinha R K, Kumar A, Saini T S. Analysis and design of single-mode  $\text{As}_2\text{Se}_3$ -chalcogenide photonic crystal fiber for generation of slow light with tunable features [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016, 22(2): 4900706.
- [42] Büttner T F S, Kabakova I V, Hudson D D, *et al.* Phase-locking and pulse generation in multi-frequency Brillouin oscillator via four wave mixing[J]. *Scientific Reports*, 2015, 4: 5032.
- [43] Pant R, Poulton C G, Choi D Y, *et al.* On-chip stimulated Brillouin scattering [J]. *Optics Express*, 2011, 19(9): 8285-8290.
- [44] Pant R, Li E, Choi D Y, *et al.* Cavity enhanced stimulated Brillouin scattering in an optical chip for multiorder Stokes generation [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(18): 3687-3689.
- [45] Kabakova I V, Pant R, Choi D Y, *et al.* Narrow linewidth Brillouin laser based on chalcogenide photonic chip [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(17): 3208-3211.
- [46] Büttner T F S, Merklein M, Kabakova I V, *et al.* Phase-locked, chip-based, cascaded stimulated Brillouin scattering [J]. *Optica*, 2014, 1(5): 311-314.
- [47] Pant R, Marpaung D, Kabakova I V, *et al.* On-chip stimulated Brillouin Scattering for microwave signal processing and generation [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(5): 653-666.
- [48] Merklein M, Casas-Bedoya A, Marpaung D, *et al.* Stimulated Brillouin scattering in photonic integrated circuits: novel applications and devices [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016, 22(2): 6100111.
- [49] Yi L L, Wei W, Jaouën Y, *et al.* Polarization-independent rectangular microwave photonic filter based on stimulated Brillouin scattering [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(2): 669-675.
- [50] Zhang W W, Minasian R A. Widely tunable single-passband microwave photonic filter based on stimulated Brillouin scattering [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(23): 1775-1777.
- [51] Xing C, Ke C J, Zhang K, *et al.* Polarization- and wavelength-independent SBS-based filters for high resolution optical spectrum measurement [J]. *Optics Express*, 2017, 25(18): 20969-20982.
- [52] Byrnes A, Pant R, Li E B, *et al.* Photonic chip based tunable and reconfigurable narrowband microwave photonic filter using stimulated Brillouin scattering [J]. *Optics Express*, 2012, 20(17): 18836-18845.
- [53] Morrison B, Marpaung D, Pant R, *et al.* Tunable microwave photonic notch filter using on-chip stimulated Brillouin scattering [J]. *Optics Communications*, 2014, 313: 85-89.