

# 受激布里渊散射介质——全氟聚醚的 温度特性研究\*

哈斯乌力吉 李 杏 郭翔宇 鲁欢欢 吕志伟<sup>†</sup> 林殿阳 何伟明 范瑞清

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 可调谐激光技术国家级重点实验室, 哈尔滨 150080)

(2010 年 3 月 8 日收到; 2010 年 3 月 18 日收到修改稿)

受激布里渊散射(SBS)介质——全氟聚醚(PFPE)不仅具有低吸收高负载的SBS特性,还具有低的流点或高的沸点,可适合于较宽温度范围之内工作.通过分析PFPE的化学结构,对PFPE具有良好的SBS特性及独特物理化学特性进行了解释.在连续Nd:YAG种子注入激光系统中选用HT230,DET和HS260三种PFPE进行了不同温度下SBS特性研究.结果表明,PFPE不仅具有良好的SBS特性,还可以在低温或高温条件下工作,这为不同温度下研究SBS相位共轭镜打下了良好的基础.

**关键词:** 受激布里渊散射, 介质, 全氟聚醚, 温度特性

**PACC:** 4265G, 4265F

## 1. 引 言

受激布里渊散射(SBS)相位共轭技术是获得相位共轭光的重要手段,与其他非线性相位共轭技术相比,SBS相位共轭具有频移小、结构简单、高保真度和高反射率的特点,因此多年来SBS相位共轭一直被广泛地研究<sup>[1-10]</sup>.大量研究表明介质对SBS性能有很大的影响,研究介质性能是进一步提高SBS特性的重要环节之一<sup>[11-14]</sup>.以往人们一般是在常温下进行SBS相位共轭镜的研究,很少考虑介质温度的变化对SBS特性的影响.我们的前期研究工作表明,介质温度对SBS特性有很大的影响,通过改变介质的温度,可以控制其SBS特性<sup>[15]</sup>.同时,介质温度的改变也对介质提出了新的要求,即介质不仅应具有良好的SBS特性,而且还必须具有低的流点或高的沸点,否则高温或低温条件下无法正常工作.

2006年Park等<sup>[13]</sup>研究了几种全氟聚醚(PFPE)介质的SBS特性.他们的研究主要集中在物理特性和SBS特性上,而对其化学结构与SBS特性的关系几乎没有涉及.本文从介质化学结构与SBS

特性的关系入手,解释了PFPE具有良好SBS性能的原因,并在连续Nd:YAG种子注入激光系统中选用HT230,DET和HS260等三种PFPE在不同温度下进行SBS特性研究.结果表明,PFPE不仅具有良好的SBS特性,而且还具有低的流点或高的沸点,可适合于较宽温度范围之内工作.PFPE介质的选用不仅大大增加了SBS介质的种类,而且为不同温度下研究SBS相位共轭镜打下了良好的基础.

## 2. PFPE介质的化学结构

PFPE作为太空机械元器件润滑剂使用已有几十年的历史,近几年在半导体、制药、化工、航空和液晶显示屏制造等方面也得到了广泛的应用.PFPE具有无味、无色、无毒、无刺激性,而且透明等特性<sup>[16-18]</sup>,这些特性可以从PFPE的分子结构中得到解释.PFPE与烃类聚醚的分子结构相似,只是在PFPE分子中,氟原子代替了氢原子,从而以更强的C—F键(键能为439.0 kJ/mol)代替了C—H键(键能为414.0 kJ/mol)<sup>[19]</sup>.PFPE含有多条碳原子链,每个碳原子上都附着了两个氟原子,这些碳原子链

\* 国家自然科学基金(批准号:60778019,60878005,20771030)、教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号:NCET-08-0173)和哈尔滨工业大学优秀团队支持计划资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: zw\_lu@sohu.com

又通过氧原子连接成更长的链. 氟原子为分子链提供坚固的覆盖保护层, 同时氧原子又赋予它们可塑性. 其结果是 PFPE 不受任何腐蚀性物质的影响, 也不与其他物质混合, 只与同类混合. 这就使得 PFPE 具有更高的热稳定性、氧化稳定性、良好的化学惰性和绝缘性. 根据是否有侧链把以上 PFPE 分为两大类, 即直链型 PFPE 和侧链型 PFPE, 如图 1 所示.

目前, PFPE 产品主要有 Krytox 系列、Fomblin 系列、Galden 系列、Demnum 系列和 Goruber 系列等. 本文主要研究 Goruber 系列产品, 根据用途 Goruber 系列又可以分为以下几种: 热传导液、可靠性测试液和气相导热液等, 其中还有多种型号, 如表 1 所列. Goruber 系列的分子结构属于侧链型, 如图 2 所示.

对于不同的 Goruber 系列介质而言, 它们的分

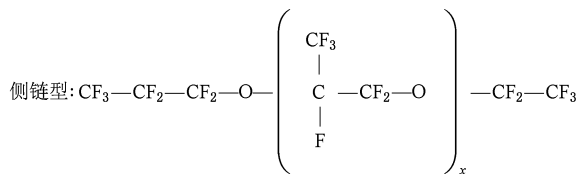
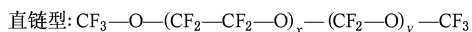


图 1 直链型和侧链型 PFPE 的分子结构<sup>[17]</sup>

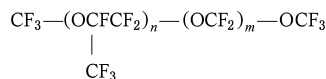


图 2 Goruber 系列 PFPE 的分子结构

子结构近似, 只是分子链的长短不同, 即分子中  $n$  或  $m$  不同. 一般情况下, 分子链越长, 平均分子量越大,

表 1 PFPE 的物理特性<sup>[12]</sup>

	介质	折射率	运动黏度/ $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	沸点/ $^{\circ}\text{C}$	平均分子量	流点/ $^{\circ}\text{C}$
热传导液	HT55	1.280	0.45	1.65	55	340	-110
	HT70	1.280	0.50	1.68	70	410	-115
	HT90	1.280	0.75	1.69	90	460	-110
	HT-110	1.280	0.77	1.72	110	580	-100
	HT135	1.280	1.00	1.73	135	610	-100
	HT170	1.280	1.80	1.77	170	760	-97
	HT200	1.281	2.40	1.79	200	870	-85
	HT230	1.283	4.40	1.82	230	1020	-77
	HT270	1.283	11.7	1.85	270	1550	-66
可靠性测试液	DET	1.280	0.60	1.70	91	390	-110
	D100	1.280	0.81	1.77	104	416	-103
	E85	1.280	0.57	1.69	80	400	-100
	D80	1.280	0.55	1.73	80	390	-79
	D02	1.280	1.80	1.77	175	760	-97
	D03	1.280	2.40	1.79	203	870	-85
	D02TS	1.280	1.70	1.77	165	750	-97
	D05	1.280	4.40	1.82	230	1020	-77
气相导热液	LS155	1.280	1.40	1.76	155	700	—
	LS165	1.280	1.60	1.77	165	740	—
	LS200	1.280	2.50	1.79	200	870	—
	LS210	1.280	2.90	1.80	210	920	—
	LS215	1.280	3.80	1.80	215	950	—
	LS230	1.280	4.40	1.82	230	1020	—
	HS240	1.280	5.30	1.82	240	1085	—
	HS260	1.280	7.00	1.83	260	1210	—

分子之间的作用力就越大,沸点就越高,其他物理化学性质也有一定的差异.从表 1 可以看出,部分 PFPE 的流点很低,适合于低温条件下工作;而部分 PFPE 的沸点很高,适合于高温条件下工作.

PFPE 的良好 SBS 特性主要表现在低吸收和高负载特性上.从图 1 的分子结构式可知,PFPE 分子当中只含有 C—C, C—O 和 C—F 化学键,而不含有对近红外光有吸收的 X—H (X 代表 C, N, O, S, P) 化学键<sup>[20]</sup>,因此它们对红外光的吸收很小.另外,氟是其中半径最小的原子,它恰好把碳链骨架严密地包住,起着良好的保护作用,因此 PFPE 的光学击穿阈值也很高<sup>[21]</sup>.

### 3. PFPE 介质的 SBS 特性和温度特性

#### 3.1. 实验装置

实验装置如图 3 所示,连续 Nd:YAG 种子注入激光器的输出光波长为 1.064  $\mu\text{m}$ ,重复率为 1 Hz,线宽为 90 MHz,脉冲宽度为 6 ns,发散角约为 0.45 mrad. Nd:YAG 激光器产生的 s 偏振光通过 1/2 波片变为 p 偏振光, p 偏振光经 1/4 波片后变成圆偏振光,并入射到 SBS 系统中. SBS 系统由振荡池(池长为 60 cm)和透镜(焦距为 30 cm)组成,抽运光首先被透镜聚焦到振荡池中产生 SBS 作用,并产生 Stokes 光. 偏振片和 1/4 波片组成隔离器,防止后向 Stokes 光进入 YAG 激光器. 产生的 Stokes 光通过 1/4 波片后变为 s 偏振光,并被偏振片反射. 介质温度是通过半导体芯片温控系统来控制. 为了消除低温时由池内外温差引起的 SBS 池窗片起霜问题,设计了双窗片式结构的 SBS 池<sup>[15]</sup>. 由于第一层和第二层窗片之间抽真空,因此两个窗片均不起霜,任何温差下光束均能顺利通过. 抽运光和 Stokes 光的能量用 NIM-E1000 型激光能量计探测,脉冲波形用光电二极管探测,并用 TDS684A 型数字示波器来记录.

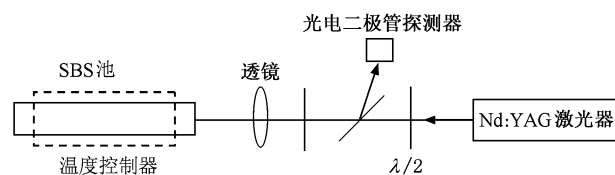


图 3 实验装置示意图

#### 3.2. PFPE 介质的 SBS 特性

首先测定了 HT230, DET 和 HS260 等介质的吸收系数和光学击穿阈值,结果表明,上述介质的吸收系数均在  $10^{-3} \text{ cm}^{-1}$  量级或更小,而光学击穿阈值均在  $10^2 \text{ GW/cm}^2$  量级或更大. 实验中发现,虽然不同种类 PFPE 的吸收系数和光学击穿阈具有一定的差异,但是它们都具有低吸收高负载的特性,明显优于以往常用的液体介质(如  $\text{CCl}_4$ ,  $\text{CS}_2$ , 水, 乙醇, 苯等),并且具有无味、无色、无毒、无刺激性等独特的特性. 同时,根据文献[22—24]的 SBS 参数的公式计算得到部分 PFPE 介质的增益系数、布里渊频移和声子寿命,结果如表 2 所列.

表 2 入射光波长为 1064 nm 时 PFPE 的 SBS 参数

	增益系数 $/\text{cm}\cdot\text{GW}^{-1}$	布里渊频移 $/\text{MHz}$	声子寿命 $/\text{ns}$	吸收系数 $/\text{cm}^{-1}$	光学击穿阈值 $/\text{GW}\cdot\text{cm}^{-2}$
HT230	4.1	1515	0.1	$<10^{-3}$	$>10^2$
DET	5.7	1143	0.8	$\approx 10^{-3}$	$>10^2$
HS260	2.4	1638	0.1	$\approx 10^{-3}$	$\approx 10^2$

图 4 是在室温下 HT230, DET 和 HS260 等介质的 SBS 能量反射率随入射光能量的变化曲线. 从图 4 可以看出,随着入射光能量的提高, SBS 反射率先是迅速上升,然后缓慢上升. 这是因为入射光能量越高,系统指数增益系数 ( $G = gIL$ , 式中  $G$  为系统指数增益系数,  $g$  为介质增益系数,  $I$  为入射光功率密度,  $L$  为有效作用长度) 越大,进而导致更多的入射光能量向 Stokes 光能量转移,因此 SBS 反射率迅速提高;但是,入射光能量增加到一定值以后,由于能量提取效率趋于饱和,因此 SBS 反射率缓慢上

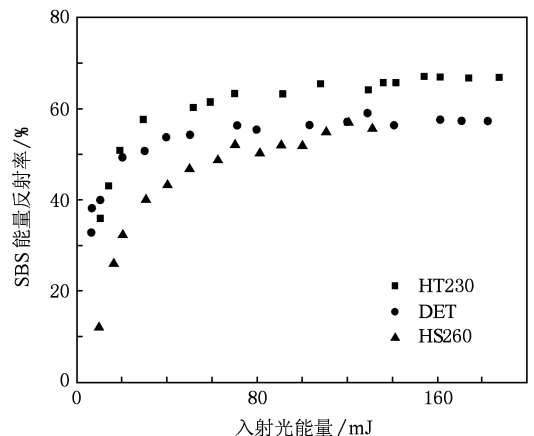


图 4 实验得到 PFPE 介质的 SBS 能量反射率随入射光能量的变化曲线

升<sup>[25]</sup>. 另外,从图 4 还可以看出,当入射光能量相同时,HT230, DET 和 HS260 的能量反射率有一定的差异,这是因为它们的增益系数和吸收系数不同所致.

### 3.3. PFPE 介质的温度特性

图 5 是入射光能量恒定 (50 mJ) 时, HT230, DET 和 HS260 等介质的 SBS 能量反射率随介质温度的变化曲线. 从图 5 可以看出,刚开始随着介质温度的升高, SBS 能量反射率几乎呈线性提高,但是当温度达到 20 °C 时,能量反射率反而开始下降. 这是因为介质温度越高,运动黏度越小,增益系数越大,因此 SBS 能量反射率就越高<sup>[15]</sup>. 但是,随着温度

的升高,介质的吸收系数也开始增大<sup>[26]</sup>,进而导致入射光能量的损耗,因此 SBS 能量反射率反而开始下降. 为了验证吸收系数的影响,测定了不同温度下 HT230 的吸收系数,结果显示,室温下 HT230 吸收系数为  $0.0004 \text{ cm}^{-1}$ ,而温度升高到 32 °C 时,其吸收系数增大到了  $0.0139 \text{ cm}^{-1}$ . 在实验中观察到,当改变入射光能量时,上述介质的 SBS 能量反射率随温度的变化趋势与图 5 基本相同. 另外,在实验中还观察到,上述介质在 -50—50 °C 之间不出现凝固或沸腾等现象,能够稳定产生 SBS 效应.

## 4. 结 论

介质温度对 SBS 特性有很大的影响,通过改变介质的温度,可以控制其 SBS 特性. 介质温度的改变也对介质的温度特性提出了新的要求. PFPE 是近期发现的 SBS 介质,不仅具有低吸收高负载的 SBS 特性及无味、无色、无毒、无刺激性等物理化学特性,而且还具有低的流点或高的沸点,适合于较宽温度范围之内工作,这为不同温度下研究 SBS 相位共轭镜打下了良好的基础. 当 PFPE 介质的温度小于 20 °C 时, SBS 能量反射率随着介质温度的升高而提高;但是,当 PFPE 介质的温度大于 20 °C 时, SBS 能量反射率反而随着介质温度的升高而降低. 介质温度的改变,首先导致介质增益系数和吸收系数的改变,进而导致了 SBS 能量反射率的改变.

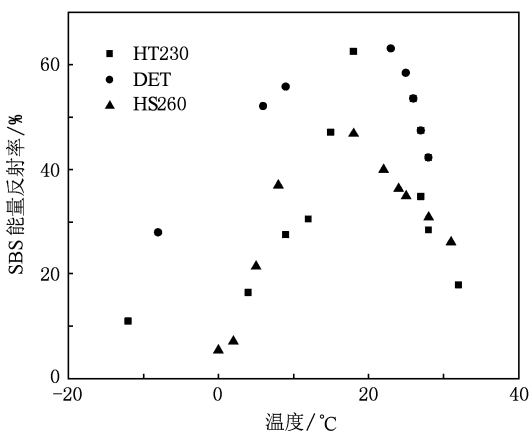


图 5 入射光能量为 50 mJ 时 SBS 能量反射率随介质温度的变化曲线

[1] Liu J, Bai J H, Ni K, Jing H M, He X D, Liu D H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 260 (in Chinese) [刘娟, 白建辉, 倪恺, 景红梅, 何兴道, 刘大禾 2008 物理学报 **57** 260]

[2] Wang S, Chen J, Tong L X, Gao Q S, Liu C, Tang C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1719 (in Chinese) [汪莎, 陈军, 童立新, 高清松, 刘崇, 唐淳 2008 物理学报 **57** 1719]

[3] Guo S F, Lin W X, Lu Q S, Chen S, Lin Z Z, Deng S Y, Zhu Y X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2218 (in Chinese) [郭少锋, 林文雄, 陆启生, 陈燧, 林宗志, 邓少永, 朱永祥 2007 物理学报 **56** 2218]

[4] Wang S H, Ren L Y, Liu Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3943 (in Chinese) [王士鹤, 任立勇, 刘宇 2009 物理学报 **58** 3943]

[5] Chen X D, Shi J W, Liu J, Liu B, Xu Y X, Shi J L, Liu D H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1047 (in Chinese) [陈旭东, 石锦卫, 刘娟, 刘宝, 许艳霞, 史久林, 刘大禾 2010 物理学报 **59** 1047]

[6] Wang Y L, Lü Z W, Wang S Y, Zheng Z X, He W M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4675 (in Chinese) [王雨雷, 吕志伟, 王双义, 郑振兴, 何伟明 2009 物理学报 **58** 4675]

[7] Gao W, Lü Z W, He W M, Hasi W L J, Zhang Z 2008 *Chin. Phys. B* **17** 3765

[8] Gong S, Hasi W L J, Lü Z W, Dong F L, Lin D Y, He W M, Zhao X Y, Fan R Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 304 (in Chinese) [公胜, 哈斯乌力吉, 吕志伟, 董粉丽, 林殿阳, 何伟明, 赵晓彦, 范瑞清 2009 物理学报 **58** 304]

[9] Hasi W L J, Lu H H, Gong S, Fu M L, Lü Z W, Lin D Y, He W M 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2835

[10] Hasi W L J, Lu H H, Fu M L, Gong S, Lu Z W, Lin D Y, He W M, Gao W 2009 *Chin. Phys. B* **18** 5362

[11] Yoshida H, Kmetik V, Fujita H, Nakatsuka M, Yamanaka T, Yoshida K 1997 *Appl. Opt.* **36** 3739

[12] Hasi W L J, Lü Z W, Gong S, Liu S J, Li Q, He W M 2008 *Appl. Opt.* **47** 1010

- [13] Park H, Lim C, Yoshida H, Nakatsuka M 2006 *Jpn. J. Appl. Phys.* **45** 5073
- [14] Hasi W L J, Lü Z W, Gong S, He W M, Lin D Y, Zhang W 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6360 (in Chinese) [哈斯乌力吉、吕志伟、公 胜、何伟明、林殿阳、张 伟 2008 物理学报 **57** 6360]
- [15] Hasi W L J, Lü Z W, Guo X Y, Sun X H, Lu H H, Fu M L, Gong S, Geng X Z, Lin D Y, He W M 2009 *Laser Part. Beams* **27** 733
- [16] Xie Y 2005 *Synthetic Lubricants* **32** 38 (in Chinese) [谢 宇 2005 合成润滑材料 **32** 38]
- [17] Shi H Y, Long C 2004 *Chin. J. EEC* **2** 254 (in Chinese) [史红宇、龙 村 2004 中国体外循环杂志 **2** 254]
- [18] He X Y, Zhou L 2003 *Chem. Prod. Techn.* **10** 5 (in Chinese) [何小瑜、周 丽 2003 化工生产与技术 **10** 5]
- [19] Xia S Z, Luo Y M 2005 *Organic Chemistry* (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press) pp7,28
- [20] Zhong H Q 1984 *Introduction of the Infrared Spectra* (Beijing: Chemical Industry Press) p176 (in Chinese) [钟海庆 1984 红外光谱法入门 (北京: 化学工业出版社) 第 176 页]
- [21] Hasi W L J, Lü Z W, Li Q, Ba D X, Zhang Y, He W M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5252 (in Chinese) [哈斯乌力吉、吕志伟、李 强、巴德欣、张 伟、何伟明 2006 物理学报 **55** 5252]
- [22] Pohl D, Kaiser W 1970 *Phys. Rev. B* **1** 31
- [23] Erokhin A I, Kovalev V I, Faizullof F S 1986 *Sov. J. Quantum Electron.* **16** 872
- [24] Hasi W L J, Lü Z W, Liu S J, He W M, Zhao X Y, Zhang W 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2976 (in Chinese) [哈斯乌力吉、吕志伟、刘述杰、何伟明、赵晓彦、张 伟 2008 物理学报 **57** 2976]
- [25] Hasi W L J, Lü Z W, Li Q, Ba D X, He W M 2007 *Chin. Phys.* **16** 1385
- [26] Langford V S, McKinley A J, Quickenden T I 2001 *J. Phys. Chem. A* **105** 8916

## Investigation on stimulated Brillouin scattering medium——perfluoropolyether at high and low temperatures \*

Hasi Wu-Li-Ji Li Xing Guo Xiang-Yu Lu Huan-Huan Lü Zhi-Wei<sup>†</sup> Lin Dian-Yang  
He Wei-Ming Fan Rui-Qing

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Institute of Opto-Electronics,  
Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

(Received 8 March 2010; revised manuscript received 18 March 2010)

### Abstract

In this paper, the stimulated Brillouin scattering (SBS) media perfluoropolyether (PFPE) with unique physicochemical properties and SBS properties are researched. The PFPE has a small absorption coefficient and can be used to increase the load-ability of SBS system. The PFPE with a high boiling point and a low pouring point can operate at high and low temperatures, respectively. The SBS properties of PFPE have been analyzed in detail and validated in Q-switched Nd:YAG laser system. The experimental results indicate that the media not only have good SBS characteristics but also can be used in a wide temperature range, thereby has great advantage for experimental investigation on SBS phase-conjugated mirror at different temperatures.

**Keywords:** stimulated Brillouin scattering, media, perfluoropolyether, temperature property

**PACC:** 4265C, 4265F

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60778019, 60878005, 20771030), the Program for the New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education, China (Grant No. NCET-08-0173) and the Program of Excellent Team in Harbin Institute of Technology, China.

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: zw\_lu@sohu.com