

# 全氟碳化合物新介质 SBS 相位共轭镜和 光限幅器选取原则的研究<sup>\*</sup>

公 胜 哈斯乌力吉 吕志伟<sup>†</sup> 董粉丽 林殿阳 何伟明 赵晓彦 范瑞清

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨 150001)

(2008 年 4 月 17 日收到, 2008 年 6 月 23 日收到修改稿)

介绍了低吸收高负载特性的全氟碳化合物 SBS 新介质, 研究了 SBS 相位共轭镜和 SBS 光限幅器对新介质的选取原则, 并在 Nd:YAG 调 Q 激光器中进行了实验验证. 结果表明, SBS 相位共轭镜需要平均分子量小, 运动黏度小, 增益系数大的介质, 而 SBS 光限幅器需要平均分子量小, 运动黏度大, 增益系数小的介质. 新介质的发现增加了 SBS 介质的种类, 而介质的选取原则对新介质的选用打下了良好的基础.

关键词: SBS 新介质, 选取原则, 平均分子量, 运动黏度

PACC: 4265C, 4265F

## 1. 引 言

受激布里渊散射(SBS)是 Chiao 等人利用调 Q 红宝石激光在石英和蓝宝石中观测到的<sup>[1]</sup>. SBS 具有相位共轭、脉冲压缩、激光并束和光限幅等特性, 因而多年来受到广泛的研究<sup>[2-6]</sup>. 介质是 SBS 产生的载体, 也是实现 SBS 特性的基础. 一般来讲, 当入射光光强达到一定的阈值, 普通介质中均可产生 SBS 效应, 但是大量的研究表明, 介质的特性对 SBS 效应有着很大的影响<sup>[7]</sup>. 虽然通过改进实验装置的方法(如紧缩双池和独立双池等), 在一定程度上可以使 SBS 特性得到提高, 但往往由于改进实验装置增加了系统的复杂性, 因此实际应用中受到一定的限制. 然而, 通过选取性能良好的介质, 可以使 SBS 特性变得极为理想, 因此寻找性能良好的 SBS 介质是一直备受关注的方面.

目前使用的 SBS 介质从状态上可以分为三类, 即气体、液体和固体. 由于固体和气体介质分别存在击穿阈值过小和增益系数过小的缺点, 因此一般研究均将重点放在液体介质上. Yoshida 等人发现了低吸收高负载的新介质 FC-72 和 FC-75, 从而大大提高

了 SBS 的性能<sup>[8]</sup>. 之后, FC-77, FC-84, FC-3255, FC-3283, HT-70, HT-110, HT-135, HT-200, HT-230 和 HT-270 等性能良好的 SBS 新介质也陆续用于研究并取得了理想的效果<sup>[9]</sup>. 上述新介质的研究主要集中在它们的物理特性和 SBS 特性上, 而对其化学结构与 SBS 特性的关系几乎没有进行任何研究. 文献[10]从介质的化学结构与 SBS 特性的关系入手, 确定了上述介质的分子结构(它们均属于全氟碳化合物, 如全氟烷烃、全氟胺、全氟环醚和全氟聚醚等), 并寻找出了其他全氟碳化合物新介质, 如 FC-70, FC-43, FC-40, FC-87, HT-55, DET 和 LS155 等.

全氟碳化合物良好的 SBS 特性主要表现在低吸收和高负载等两个方面, 这与其分子结构密切相关. 氟是半径最小的原子, 其范德华半径为 0.135 nm, 在全氟化合物分子中, 氟原子恰好把碳链骨架严密地包住, 起着良好的保护作用<sup>[11]</sup>, 因此使其抗光学击穿阈值(OBT)较高. 在近红外光谱范围内(对波长为 1064 nm 的 Nd:YAG 激光器而言), 介质分子的吸收主要是由 C—H, N—H, O—H, S—H 和 P—H 键的倍频、合频的吸收<sup>[12]</sup>. 而全氟碳化合物只含 C—C, C—F, C—O 或 C—N 化学键, 而不含 C—H, N—H, O—H, S—H 和 P—H 等化学键, 因此全氟碳化合物对近

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 60778019, 20771030, 60878005), 中国博士后科学基金(批准号: 20060390795)和哈尔滨工业大学优秀团队支持计划资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: zw\_lu@sohu.com

红外光的吸收很小.图 1 是全氟聚醚的分子式<sup>[13]</sup>,对于不同的全氟聚醚而言,它们的分子结构近似,只是分子链的长短不同,即分子中  $n$  或  $m$  的大小不同.分子链越长,平均分子量就越大,分子之间的作用力就越大,运动黏度就越高,其物理化学性质也有一定的差异.

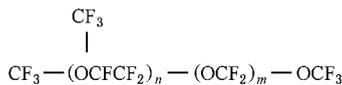


图 1 全氟聚醚的分子结构示意图

全氟碳化物具有无色、无毒、无味、低挥发性和很好的热稳定性,氧化稳定性,化学惰性 etc 性质<sup>[14]</sup>,这不仅为系统的长时间工作提供了基础,而且也使得实验研究变得方便操作.最近研究表明,全氟碳化物在红外和可见光范围之内是良好的 SBS 介质,但是在紫外光(266 nm)的照射下,会使 C—F 化学键发生断裂,使 SBS 效应受到一定的限制,所以不适合在紫外波段使用<sup>[15]</sup>.

## 2. SBS 介质的选取原则

关于 SBS 相位共轭镜(用于产生相位共轭光、激光脉冲压缩和激光并束等)已经有广泛的研究,所研究的都是布里渊介质中后向散射光的特性.对激光入射到布里渊介质后透射光的特性却少有研究.文献[5]研究了 SBS 光限幅器(产生 SBS 效应之后的透射光)特性.对于 SBS 相位共轭镜和 SBS 光限幅器而言,它们对介质的要求是不同的.在 SBS 相位共轭镜中为了获得高能量反射率,要求介质的增益系数越大越好,而在 SBS 光限幅器中为了获得高透射率的输出光,要求介质的增益系数越小越好.

### 2.1. SBS 相位共轭镜中介质的选取原则

SBS 能量反射率由系统指数增益系数决定,即

表 1 适用于 SBS 相位共轭镜的全氟碳化物新介质及其参数

介质	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	$\text{OBT}/\text{GW}\cdot\text{cm}^{-2}$	$\nu/\text{MHz}$	$g/\text{cm}\cdot\text{GW}^{-1}$	$\Gamma/\text{MHz}$	$\tau/\text{ns}$	$M$	$\eta/10^{-6}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
FC-87	$< 10^{-3}$	$> 100$	1226	6.6	297	1.1	290	0.27
FC-72	$< 10^{-3}$	$> 100$	1100	6.0	270	1.2	340	0.40
FC-75	$< 10^{-3}$	$> 100$	1340	5.0	350	0.9	420	0.80
FC-77	$< 10^{-3}$	$> 100$	1360	5.1	486	0.7	415	0.72
FC-84	$< 10^{-3}$	$> 100$	1221	6.0	371	0.9	388	0.53
HT-70	$< 10^{-3}$	$> 100$	1166	5.7	359	0.9	410	0.50
HT-55	$< 10^{-3}$	$> 100$	1143	6.2	318	1.0	340	0.45

系统指数增益系数越大,能量反射率就越高.系统指数增益系数  $G$  的表达式为<sup>[16]</sup>

$$G = gIL, \quad (1)$$

式中  $g$  为介质的增益系数,  $I$  为入射光功率密度,  $L$  为有效作用长度.

从(1)式可知,通过增大  $g$ ,  $I$  和  $L$  值来提高  $G$ .  $g$  的大小可通过选用不同增益系数的介质来调整,  $L$  的大小可通过选用不同焦距的透镜来调整.虽然选用不同焦距的透镜可调整  $L$  和  $L$  值,但是可调的范围比较窄.这是因为,虽然缩短透镜焦距可提高入射光功率密度  $I$ ,但是短焦距透镜容易引起介质的光学击穿,并且使有效作用长度  $L$  变短;而增加透镜焦距,虽然增加有效作用长度  $L$  值,但是降低入射光功率密度  $I$  值,因此透镜焦距不能过短也不能过长<sup>[17]</sup>.然而,通过选用增益系数大的介质,可以方便有效地提高系统指数增益系数  $G$ ,因此在 SBS 相位共轭镜中要求介质的增益系数越大越好.

介质的增益系数  $g$  的表达式为<sup>[18]</sup>

$$g = \frac{\gamma^2}{4\pi^2 cn^3 v\eta\rho}, \quad (2)$$

式中  $\gamma$  为介质的电致伸缩系数,  $n$  为介质的折射率,  $c$  为真空中的光速,  $v$  为介质的声速,  $\eta$  为介质的运动黏度,  $\rho$  为介质的密度.从(2)式可看出,介质的增益系数与折射率、声速、运动黏度和密度等物理量均有关系.但是对于不同的液体介质而言,折射率、声速和密度等参数的差异较小(小于 1 倍),而运动黏度的差异较大(大于几倍至几十倍)<sup>[19]</sup>,因此不同介质的运动黏度的差异是引起增益系数差异的主要因素.

介质的增益系数与运动黏度成反比,运动黏度与平均分子量成正比,因此介质的平均分子量越大,分子之间的作用力就越大<sup>[20]</sup>,运动黏度就越大,增益系数就越小;反之,介质的平均分子量越小,分子之间的作用力就越小,运动黏度就越小,增益系数就越大. SBS 相位共轭镜中尽量选取分子量小,运动黏

度小,增益系数大的介质.表 1 列出了适合用于 SBS 相位共轭镜的全氟碳化合物新介质及其参数.

## 2.2. SBS 光限幅器中介质的选取原则

当入射光强度高于 SBS 阈值强度时,入射光与布里渊介质发生较强的 SBS 作用,入射光能量迅速地向 Stokes 光转移,导致 SBS 光限幅输出光能量具

表 2 适合用于 SBS 光限幅器的全氟碳化合物新介质及其参数

介质	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	$\text{OBT}/\text{GW}\cdot\text{cm}^{-2}$	$\nu/\text{MHz}$	$g/\text{cm}\cdot\text{GW}^{-1}$	$\Gamma/\text{MHz}$	$\tau/\text{ns}$	$M$	$\eta/10^{-6}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
FC-43	$< 10^{-3}$	$> 100$	1420	3.6	1800	0.2	670	2.50
FC-70	$< 10^{-3}$	$> 100$	1540	1.8	9000	0.1	820	14.0
HT-200	$< 10^{-3}$	$> 100$	1446	3.8	1724	0.2	870	2.40
HT-230	$< 10^{-3}$	$> 100$	1515	4.1	3159	0.1	1020	4.40
HT-270	$< 10^{-3}$	$> 100$	1697	2.3	8400	0.1	1550	11.7

另外,运动黏度大、增益系数小介质的声子寿命也短,这非常有利于 SBS 光限幅输出光时域平顶脉冲波形的获得<sup>[21]</sup>.介质的声子寿命  $\tau$  表达式为<sup>[18]</sup>

$$\tau = \frac{\lambda^2}{16\pi^4 n^2 \eta}, \quad (3)$$

式中  $\lambda$  为入射光波长,  $n$  为介质的折射率,  $\eta$  为介质的运动黏度.

从(3)式可知,介质声子寿命与运动黏度也成反比,即运动黏度越大,声子寿命就越短;反之,运动黏度越小,声子寿命就越长.文献[22]的研究结果表明,入射光波长为 1064 nm 时,一次 SBS 光限幅输出光时域脉冲波形前沿有一个尖峰,后沿才是平顶.这是因为 SBS 产生是基于介质声子场的建立,它的建立需要一定的弛豫时间,该弛豫时间之内入射光前沿能量直接透过介质,入射光前沿能量向 Stokes 光转移的不彻底,因此 SBS 光限幅输出光时域脉冲波形前沿容易出现尖峰.弛豫时间与介质的声子寿命有关,介质声子寿命越短,弛豫时间就越短,入射光能量向 Stokes 场转移的越彻底, SBS 光限幅输出光时域脉冲波形就越平.因此,在 SBS 光限幅器中选用运动黏度大的介质,这不仅容易获得时域平顶脉冲波形的获得,而且输出光能量也高.

## 3. 实验研究

实验装置如图 2 所示, Nd:YAG 调 Q 激光器产生的 p 偏振光通过 1/2 波片、偏振片 P 和 1/4 波片后变成圆偏振光,并射到 SBS 系统中. SBS 系统由振荡池(池长为 60 cm)和透镜 L(焦距为 30 cm)组成,入射光首先被透镜 L 聚焦到振荡池中产生 SBS

有非常平的限幅特性.文献[21]利用 SBS 光限幅获得了时域平顶脉冲波形.在 SBS 光限幅器中为了获得高能量的输出光,要求系统指数增益系数  $G$  越小越好.从(2)式可知,通过选用分子量较大,运动黏度大,增益系数小的介质,可提高 SBS 光限幅器的输出光能量.表 2 列出了适合用于 SBS 光限幅器的全氟碳化合物新介质及其参数.

作用,并产生 Stokes 光.偏振片 P 和 1/4 波片组成隔离器,防止后向 Stokes 光进入 YAG 激光器中.产生的 Stokes 光通过 1/4 波片后变为 s 偏振光,并被偏振片 P 反射.入射光、Stokes 光和 SBS 光限幅输出光的能量用能量计 ED200 探测,脉冲波形用 PIN 光电二极管探测,并用数字示波器 TDS684A 来记录.

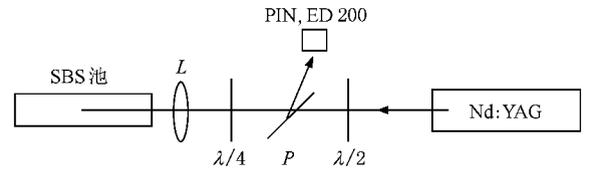


图 2 实验装置示意图

实验时 Nd:YAG 调 Q 激光器输出光波长为 1064 nm,重复率为 1 Hz,脉宽为 6 ns,发散角为 1.6 mrad(5 倍衍射极限),入射光能量的变化是通过调节 1/2 波片而实现.图 3(a)是 FC-72 和 HT-230 的 SBS 能量反射率随入射光能量的变化曲线.从图可看出,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 反射率缓慢上升<sup>[23]</sup>. FC-72 的 SBS 能量反射率比 HT-230 高,这是由于 FC-72 的增益系数比 HT-230 大的缘故,如表 1 和 2 所列.图 3(b)是 FC-72 和 HT-230 的 SBS 光限幅输出光能量随入射光功率密度的变化曲线,从图可看出, HT-230 的 SBS 光限幅输出光能量比 FC-72 高,这是由于 HT-230 的增益系数比 FC-72 小的缘故,如表 1 和 2 所列.

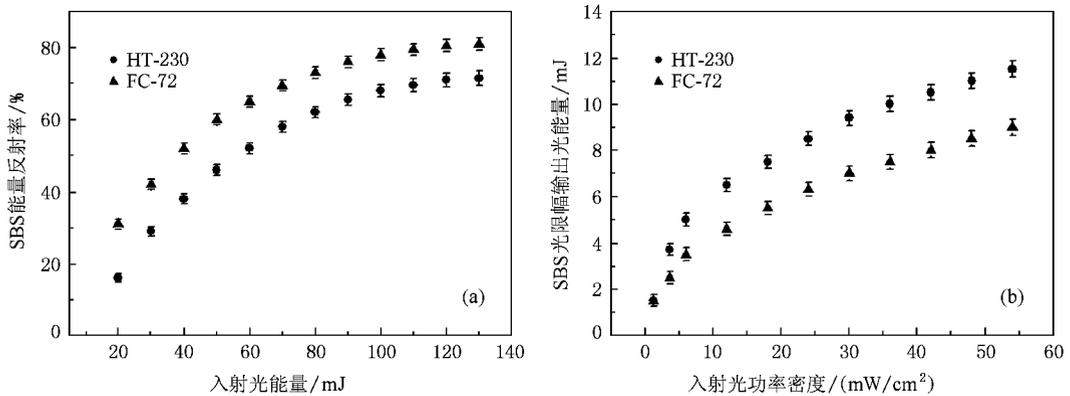


图3 FC-72和HT-230的(a)SBS能量反射率和(b)SBS光限幅输出光能量分别随入射光能量和入射光功率密度变化的实验曲线

## 4. 结 论

本文介绍了最近发现的低吸收高负载特性的全氟碳化合物SBS新介质,并研究了SBS相位共轭镜和SBS光限幅器对新介质的选取原则.在SBS相位共轭镜中,为了获得高能量反射率,要求介质的增益系数越大越好,而在SBS光限幅器中,为了获得高能量输出光,要求介质的增益系数越小越好.对于不同

的液体介质而言,运动黏度的差异是引起增益系数变化的主要因素.介质的平均分子量越大,分子之间的作用力就越大,运动黏度就越大,增益系数就越小;反之,介质的平均分子量越小,分子之间的作用力就越小,运动黏度就越小,增益系数就越大.另外,运动黏度大、增益系数小介质的声子寿命也短,这非常有利于高能量SBS光限幅输出光时域平顶脉冲波形的获得.

- [1] Chiao R Y, Townes C H, Stoicheff B P 1964 *Phys. Rev. Lett.* **12** 592
- [2] Zel'dovich B Y, Popovichev V I, Ragul'skii V V, Faizullov F S 1972 *JETP Lett.* **15** 109
- [3] Hon D T 1980 *Opt. Lett.* **5** 516
- [4] Wang S Y, Lü Z W, Lin D Y, Ding L, Jiang D B 2007 *Laser Part. Beams* **25** 79
- [5] Lü Y L, Lü Z W, He W M 2003 *High Power Laser and Particle Beams* **15** 427 (in Chinese) [吕月兰、吕志伟、何伟明 2003 强激光与粒子束 **15** 427]
- [6] Lü Z W, Hasi W L J, Gong H P, Li Q, He W M 2006 *Opt. Express* **14** 5497
- [7] Hasi W L J, Lü Z W, He W M, Wang S Y 2005 *High Power Laser and Particle Beams* **17** 51 (in Chinese) [哈斯乌力吉、吕志伟、何伟明、王双义 2005 强激光与粒子束 **17** 51]
- [8] Yoshida H, Kmetik V, Fujita H, Nakatsuka M, Yamanaka T, Yoshida K 1997 *Appl. Opt.* **36** 3739
- [9] Park H, Lim C, Yoshida H, Nakatsuka M 2006 *Jpn. J. Appl. Phys.* **45** 5053
- [10] Hasi W L J, Lü Z W, Gong S, Li Q, He W M 2008 *Appl. Opt.* **47** 1010
- [11] 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、何伟明 2006 物理学报 **55** 5252]
- [12] 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]
- [13] Xie Y 2005 *Synthetic Lubricants* **32** 38 (in Chinese) [谢宇 2005 合成润滑材料 **32** 38]
- [14] 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]
- [15] Chalus O, Diels J C 2007 *Opt. Soc. Am. B* **24** 606
- [16] Kaiser W, Maier M 1972 *Laser Handbook* (Amsterdam: North-Holland Publ. Co.) p1116
- [17] Gong H P, Lü Z W, Lin D Y, Lü Y L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2735 (in Chinese) [龚华平、吕志伟、林殿阳、吕月兰 2006 物理学报 **55** 2735]
- [18] Li Q, Lü Z W, Hasi W L J, Dong Y K, He W M 2006 *High Power Laser and Particle Beams* **18** 1481 (in Chinese) [李强、吕志伟、哈斯乌力吉、董永康、何伟明 2006 强激光与粒子束 **18** 1481]
- [19] Dean J A 1991 *Lange's Handbook of Chemistry* (13th Ed) (Beijing: Science Press) p10-95 (in Chinese) [迪安 J A 1991 兰氏化学手册(第13版)(北京:科学出版社)第10—95页]

- [ 20 ] Zeng Z Q , Zhang Z Q , Su Y C , Liang Z C , Wang Y W 1996 *Organic Chemistry* ( Beijing : Higher Education Press ) p34 ( in Chinese )[ 曾昭琼、张振权、苏永成、梁致诚、王运武 1996 有机化学(北京:高等教育出版社)第34页 ]
- [ 21 ] Hasi W L J , Lü Z W , Liu S J , Li Q , Yin G H , He W M 2008 *Appl. Phys. B* **90** 503
- [ 22 ] Lü Y L , Lü Z W , Dong Y K 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2710 ( in Chinese )[ 吕月兰、吕志伟、董永康 2004 物理学报 **53** 2710 ]
- [ 23 ] Hasi W L J , Lü Z W , Li Q , He W M 2007 *Chin. Phys.* **16** 1385

## Study on the choosing of new SBS medium perfluoro-compound for phase conjugation mirror and optical limiter<sup>\*</sup>

Gong Sheng Hasi Wu-Li-Ji Lü Zhi-Wei<sup>†</sup> Dong Fen-Li Lin Dian-Yang He Wei-Ming Zhao Xiao-Yan Fan Rui-Qing  
( Institute of Opto-electronics , Harbin Institute of Technology , Harbin 150001 , China )

( Received 17 April 2008 ; revised manuscript received 23 June 2008 )

### Abstract

In this paper , new stimulated Brillouin scattering ( SBS ) medium of perfluoro-compound with low absorption and high power-load are reported . The choosing of medium for conjugation mirror ( PCM ) and optical limiting are discussed respectively , and validated in the Nd : YAG Q-switched laser system . The results indicate that medium with small molecular weight , low kinematic viscosity and large gain coefficient should be chosen for SBS PCM ; however , medium with large molecular weight , great kinematic viscosity and small gain coefficient is needed in the optical limiting . The discovery of the new medius diversifies the SBS media and the medium choosing rules provide a guide to the application the new medium .

**Keywords** : SBS new medium , choosing principle , average molecular weight , kinematic viscosity

**PACC** : 4265C , 4265F

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 60778019 , 20771030 , 60878005 ) , the China Postdoctoral Science Foundation ( Grant No. 20060390795 ) and the Program of Excellent Team in Harbin Institute of Technology .

<sup>†</sup> E-mail : zw\_lu@sohu.com