

选用混合介质优化介质和控制受激布里渊散射特性的研究*

哈斯乌力吉[†] 李杏 郭翔宇 鲁欢欢 吕志伟 林殿阳 何伟明 范瑞清

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨 150080)

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 哈尔滨 150080)

(2010年4月28日收到; 2010年5月14日收到修改稿)

本文提出了选用混合介质优化介质和控制其SBS特性的方案. 分析了全氟碳化合物系列液体介质具有良好互溶性的缘故, 数值模拟了HT-230/FC-72混合介质的增益系数、声子寿命和布里渊频移随混合比的变化曲线. 在Continuum Nd:YAG种子注入激光系统中测定了HT-230/FC-72混合介质的吸收系数和光学击穿阈值随混合比的变化, 并实验研究了混合介质的能量反射率和Stokes光脉冲波形随混合比的变化. 通过选用混合介质不仅优化介质, 而且在一定范围之内可控制其SBS特性.

关键词: 受激布里渊散射, 混合介质, 优化介质, 控制SBS特性

PACS: 42.65.-k, 42.65.Es, 42.65.Hw

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, 因此利用SBS实现光学相位共轭已成为非线性光学相位共轭领域重要的研究内容^[1-11]. 大量研究表明介质对SBS性能有很大的影响, 因此研究SBS介质是进一步提高SBS特性的重要环节之一^[12-18]. 介质的增益系数和声子寿命成正比关系, 因此一种单元介质无法满足高增益、短寿命的需求, 但是通过选用一种高增益介质和另一种短寿命介质的混合就能够达到该目的. 另外, 由于混合介质的SBS参数随混合比不断变化^[19, 20], 因此通过选用混合介质可在一定范围之内可控制其SBS特性.

选用混合介质的前提条件是: 首先将混合的两种单元介质具有良好的互溶性, 否则混合介质分层; 其次混合介质的SBS特性随着混合比有规律性地变化, 否则无法控制其SBS特性. 虽然以往SBS液体介质很多, 但是满足上述两个条件的SBS液体介质并不多, 这也是混合介质的应用受到限制的主要因素. 目前, 全氟碳化合物系列介质是大家公认

的性能良好的SBS介质^[12-14]. 我们研究该系列介质时发现, 它们不仅具有低吸收、高负载的SBS特性, 而且互溶性特别好, 能够形成稳定、透明的混合液, 这为混合介质的研究打下了良好的基础.

本文分析了全氟碳化合物系列液体介质具有良好互溶性的缘故, 数值模拟了HT-230/FC-72混合介质的增益系数、声子寿命和布里渊频移随混合比的变化曲线. 在Continuum Nd:YAG种子注入激光系统中测定了HT-230/FC-72混合介质的吸收系数和光学击穿阈值随混合比的变化, 并实验研究了混合介质的能量反射率和Stokes光脉冲波形随混合比的变化. 通过选用混合介质不仅优化介质, 而且在一定范围之内可控制其SBS特性.

2. 理论研究

2.1. 全氟碳化合物介质的互溶性

全氟碳化合物介质的化学结构与碳氢化合物近似, 即碳氢化合物分子中与碳原子连接的氢全部被氟取代的化合物(即分子中的全部碳-氢键都转化为碳-氟键的化合物). 氟是电负性最大的元素, 氟原子代替了氢原子, 从而以更强的C-F键(键能为

* 国家自然科学基金(批准号: 60778019, 60878005, 20771030), 新世纪优秀人才支持计划(批准号: NCET-08-0173), 中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: HIT. BRET2. 20100/2)和哈尔滨工业大学优秀团队支持计划资助的课题.

[†] E-mail: hasiwuliji@sohu.com

439.0 kJ/mol) 代替了 C—H 键(键能为 414.0kJ/mol)^[21],因此全氟碳化合物具有优秀的耐久性、化学稳定性以及优异的表面性能,具有无味、无色、无毒、无刺激性和透明等特性.全氟化合物的种类繁

多,目前常用的有全氟烃、全氟胺、全氟醚和全氟聚醚等,如图 1 所示.上述全碳化合物的化学结构非常相似,分子之间的引力也相似,能够满足“相似相溶”经验规律,因此它们具有良好的互溶性.

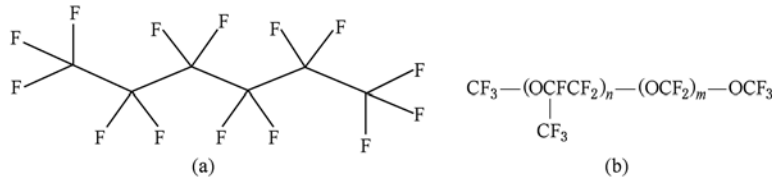


图 1 (a)全氟烃(FC-72)和(b)全氟聚醚(HT-230)的分子结构图

2.2. HT-230/FC-72 混合介质 SBS 参数随混合比的变化

根据文献[17]混合介质的 SBS 参数随混合比

变化的公式数值模拟了 HT-230/FC-72 混合介质的 SBS 参数随 FC-72 体积混合比的变化曲线,如图 2 所示.HT-230 和 FC-72 介质在 1064 nm 波长下的相关 SBS 参数如表 1 所列^[12-14].

表 1 HT-230 和 FC-72 介质的相关参数

介质	折射率	声速/m·s ⁻¹	密度/g·cm ⁻³	吸收系数/cm ⁻¹	频移/MHz	增益系数/cm·GW ⁻¹	声子寿命/ns	运动黏度/mm ² ·s ⁻¹	击穿阈值/GW·cm ⁻²
HT-230	1.283	601	1.82	<10 ⁻³	1515	4.1	0.1	4.40	>100
FC-72	1.251	468	1.68	<10 ⁻³	1100	6.0	1.2	0.40	>100

从图 2 可知,HT-230/FC-72 混合介质的增益系数、声子寿命和布里渊频移等 SBS 参数随混合比不断变化,这就说明通过混合介质在一定范围之内可

控制其 SBS 特性.例如把该混合介质的增益系数控制在 4.1—6.0 cm/GW 之间,把声子寿命控制在 0.1—1.2 ns 之间.

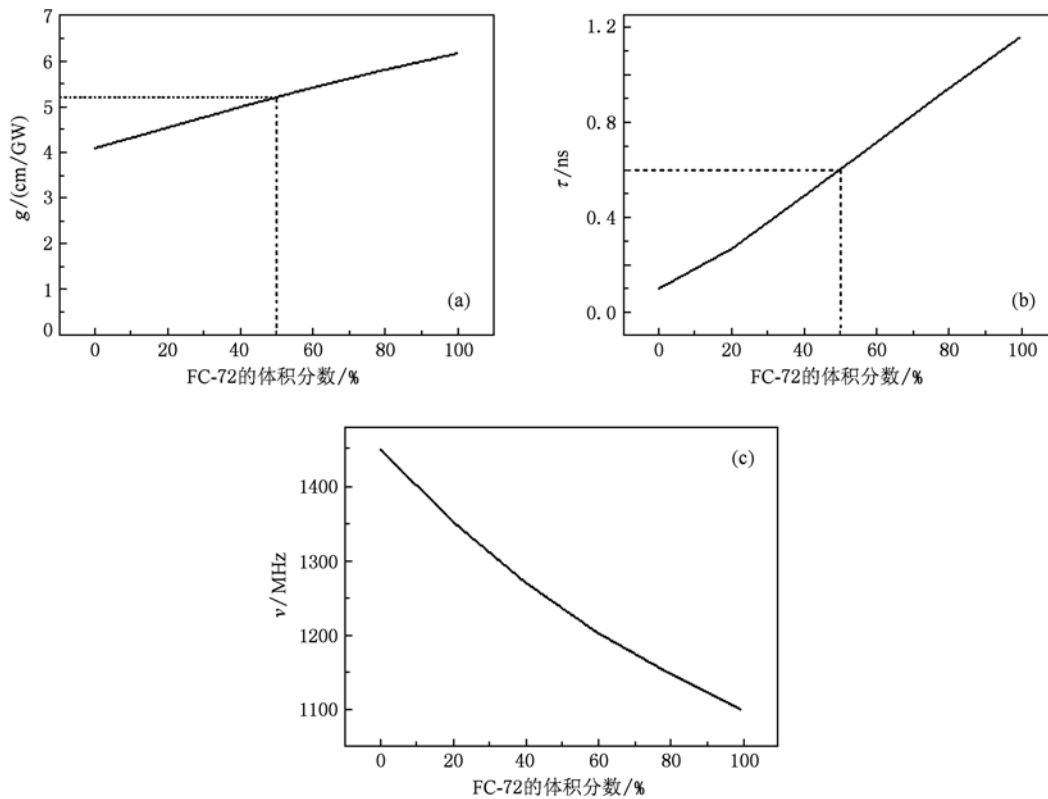


图 2 HT-230/FC-72 混合介质的(a)增益系数,(b)声子寿命,(c)布里渊频移随 FC-72 体积分数变化的数值模拟曲线

3. 实验研究

实验装置如图 3 所示, Continuum Nd: YAG 种子注入激光器产生的 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 脉冲压缩系统中. SBS 脉冲压缩系统由振荡池和透镜 L1 组成, 入射光首先被透镜 L1 ($f = 20$

cm) 聚焦到振荡池中产生 SBS 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. 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. 实验中通过调整 1/2 波片, 获得了不同能量的入射光. 入射光和 Stokes 光的能量用 MIN-E1000 激光能量计探测, 脉冲波形用 PIN 光电二极管探测, 并用数字示波器 TDS684A 来记录.

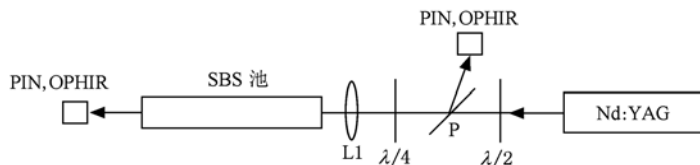


图 3 实验装置示意图

实验时 Nd: YAG 激光器输出波长为 1064 nm, 重复率为 1 Hz, 脉宽为 8 ns, 发散角为 0.45 mrad. SBS 池中选用了 HT-230/FC-72 混合介质作为散射介质. 首先测定了该混合介质的吸收系数和光学击穿阈值随 FC-72 体积分数的变化关系, 如图 4 所示. 从图可看出, HT-230/FC-72 混合介质的吸收系数和光学击穿阈值随 FC-72 体积分数的变化相对较小. 这是因为 HT-230 和 FC-72 的吸收系数和光学击穿阈值均很接近(如表 1 所示), 因此随着 FC-72 体积分数的增加其混合介质的吸收系数和光学击穿阈值无明显的变化. 另外, 实验中还发现, 该两种介质的混合不出现分层现象, 始终保持透明状态, 而且 SBS 稳定性与单元介质相同.

验曲线. 从图可看出, 随着 FC-72 体积分数的变大, SBS 能量反射率逐渐变大. 这是因为 FC-72 的增益系数比 HT-230 的大, 因此随着 FC-72 体积分数的变大, 混合介质的增益系数逐渐变大的缘故.

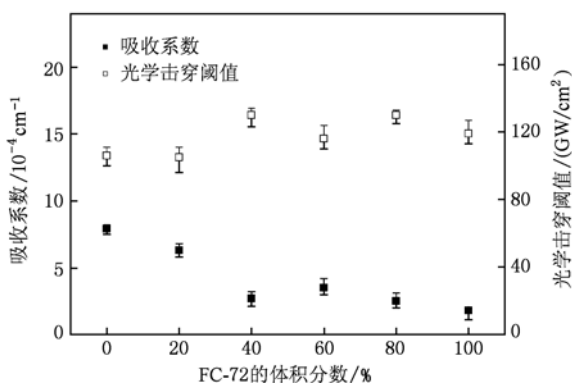


图 4 HT-230/FC-72 混合介质的吸收系数和光学击穿阈值随 FC-72 体积分数的变化曲线

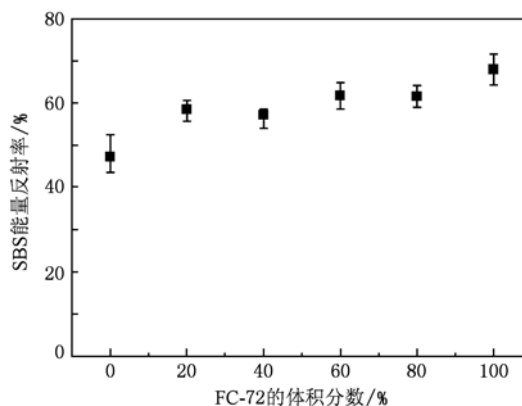


图 5 SBS 能量反射率随 FC-72 体积分数变化的实验曲线

图 5 是 20 mJ 能量入射下, HT-230/FC-72 混合介质的 SBS 能量反射率随 FC-72 体积分数变化的实

图 6 是 HT-230/FC-72 混合介质所产生的 Stokes 光脉冲波形随 FC-72 体积分数变化的实验曲线. 从图可看出, 随着 FC-72 体积分数的变大, Stokes 光脉冲波形变宽. 这是因为 Stokes 脉宽 τ_s 与声子寿命 τ 之间存在的关系为 $\tau_s \approx 2.3\tau/(gIL)$ [22] (式中 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), FC-72 的声子寿命比 HT-230 的长, 因此随着 FC-72 体积分数的变大, 混合介质的声子寿命变长所导致的.

声子寿命短的介质不仅有利于脉宽的压缩, 还有利于 SBS 相位共轭保真度的提高 [23]. 由于声子寿命和增益系数成正比关系 [14], 因此对于一种单元介

质而言,无法找到增益系数大、声子寿命短的介质,但是通过增益系数大和声子寿命短的两种介质的混合可以获得这样的介质.例如 HT-230/FC-72 混合介质中 HT-230 和 FC-72 的体积分数各占 50%

时,该混合介质的增益系数约为 5.2 cm/GW ,而声子寿命约为 0.6 ns .这样增益系数和声子寿命的 SBS 介质对进一步提高 SBS 相位共轭镜能量反射率和保真度都非常有利^[24].

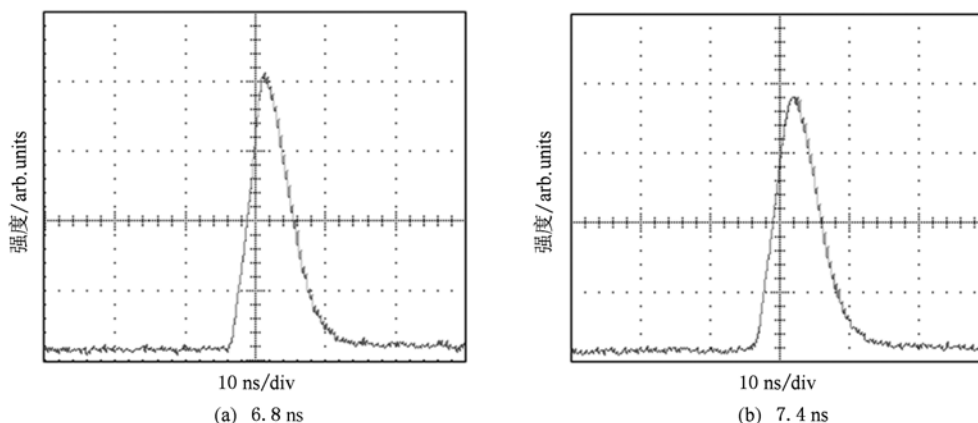


图 6 Stokes 光脉冲波形随 FC-72 体积分数变化的实验曲线 (a) FC-72 的体积分数为 20%, (b) FC-72 的体积分数为 60%

4. 结 论

全氟碳化合物介质不仅具有低吸收、高负载的 SBS 特性,而且互溶性非常好,能够形成稳定、透明的混合液,这对混合介质的选用提供了良好的基础.介质的声子寿命和增益系数成正比关系,一种单元介质无法达到高增益、短寿命的目的,但是通过增益系数大和声子寿命短两种介质的混合可达

到该目的.另外,混合介质的 SBS 参数随混合不断变化,因此通过选用混合介质在一定范围之内可控制其 SBS 特性.本文从理论和实验两方面研究了 HT-230/FC-72 混合介质的 SBS 特性.结果表明,该混合介质不仅具有良好的 SBS 特性,而且通过混合比在一定范围内可控制其 SBS 特性,这对进一步提高 SBS 相位共轭镜的性能提供了有利的条件.另外,混合介质的选用不仅增加介质的种类,而且能够满足不同的需求.

- [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] 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、徐艳霞、史久林、刘大禾 2010 物理学报 **59** 1047]
- [3] 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]
- [4] 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 [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]
- [5] 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]
- [6] Gao W, Lü Z W, He W M, Hasi W L J, Zhang Z 2008 *Chin. Phys. B* **17** 3765
- [7] Gao W, Lü Z W, He W M, Dong Y K 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2248 (in Chinese) [高玮、吕志伟、何伟明、董永康 2008 物理学报 **57** 2248]
- [8] Gong H P, Lü Z W, Lin D Y, Liu S J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5263 (in Chinese) [龚华平、吕志伟、林殿阳、刘松江 2007 物理学报 **56** 5263]
- [9] Lü Y L, Lü Z W, Dong Y K 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5849 (in Chinese) [吕月兰、吕志伟、董永康 2007 物理学报 **56** 5849]
- [10] 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
- [11] Hasi W L J, Lu H H, Fu M L, Gong S, Lü Z W, Lin D Y, He W M, Gao W 2009 *Chin. Phys. B* **18** 5362
- [12] Yoshida H, Kmetik V, Fujita H, Nakatsuka M, Yamanaka T, Yoshida K 1997 *Appl. Opt.* **36** 3739

- [13] Hasi W L J, Lü Z W, Gong S, Liu S J, Li Q, He W M 2008 *Appl. Opt.* **47** 1010
- [14] Park H, Lim C, Yoshida H, Nakatsuka M 2006 *Jpn. J. Appl. Phys.* **45** 5073
- [15] 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]
- [16] 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]
- [17] 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]
- [18] Hasi W L J, Li X, Guo X Y, Lu H H, Lü Z W, Lin D Y, He W M, Fan R Q 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8554 (in Chinese) [哈斯乌力吉、李 杏、郭翔宇、鲁欢欢、吕志伟、林殿阳、何伟明、范瑞清 2010 物理学报 **59** 8554]
- [19] Andreew N F 1982 *Opt. Spectrosc. (USSR)* **53** 4
- [20] Hasi W L J, Liu S J, Lü Z W, Yin G H, Teng Y P, He W M, Zhao X Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1709 (in Chinese) [哈斯乌力吉、刘述杰、吕志伟、尹国和、何伟明、赵晓彦 2008 物理学报 **57** 1709]
- [21] Xia S Z, Luo Y M 2005 *Organic Chemistry* (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press) p7, 28
- [22] Fedosejevs R, Offenberger A A 1985 *IEEE J. Quantum Electron.* **21** 1558
- [23] He W M, Lü Z W, Wang Q, Ma Z G 1996 *Acta Opt. Sin.* **16** 1431 (in Chinese) [何伟明、吕志伟、王 琪、马祖光 1996 光学学报 **16** 1431]
- [24] Wang C, Lü Z W, Wang X H, Lin D Y, Han S Y, Zhao X Y 2001 *The proceeding of the 6th National Youth Academic Interchange Conference of Laser Science and Technology* 481 (in Chinese) [王 超、吕志伟、王晓慧、林殿阳、韩松巍、赵晓彦 2001 第六届全国激光科学技术青年学术交流会议论文集 481]

Optimization of medium and control characteristics of stimulated Brillouin scattering based on mixed media *

Hasi Wu-Li-Ji[†] Li Xing Guo Xiang-Yu Lu Huan-Huan Lü Zhi-Wei Lin Dian-Yang
He Wei-Ming Fan Rui-Qing

(Institute of Opto-electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

(National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable laser, Harbin Institute of Technology Harbin 150080, China)

(Received 28 April 2010; revised manuscript received 14 May 2010)

Abstract

In this paper, the optimization of medium and control characteristics of stimulated Brillouin scattering (SBS) based on mixed media is investigated. The excellent intersolubility of perfluorocarbon liquid media is analyzed and the dependence of gain coefficient, phonon lifetime and Brillouin frequency shift of HT-230/FC-72 mixed media on mixing-ratio is numerically simulated. In Continuum's Nd: YAG seed-injected laser system, we measured absorption coefficient, optical breakdown threshold, energy reflectivity and Stokes pulses waveform of HT-230/FC-72 mixture under different mixing-ratio. The results indicate that the mixed media not only can optimize the medium, but also can control the characteristics of SBS within a certain range.

Keywords: stimulated Brillouin scattering, mixed media, optimization of medium, control characteristics of SBS

PACS: 42.65.-k, 42.65.Es, 42.65.Hw

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60778019, 60878005, 20771030), the Program for New Century Excellent Talents in University (Grant No. NCET-08-0173), the Fundamental Research Funds for Central Universities (Grant No. HIT-BRET2.20100/2) and the Program of Excellent Team in Harbin Institute of Technology.

[†] E-mail: hasiwuliji@sohu.com