

# 混合介质的 SBS 参数随混合比变化的研究\*

哈斯乌力吉<sup>1)†</sup> 吕志伟<sup>2)†</sup> 刘述杰<sup>2)</sup> 何伟明<sup>2)</sup> 赵晓彦<sup>2)</sup> 张 伟<sup>1)</sup>

1) 哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心, 哈尔滨 150001)

2) 哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨 150001)

(2007 年 7 月 26 日收到, 2007 年 9 月 17 日收到修改稿)

从混合介质的折射率、黏度、密度和声速等物理量随混合比的变化关系入手, 推导出了混合介质的布里渊线宽、声子寿命和增益系数等受激布里渊散射(SBS)参数随混合比的变化关系. 数值模拟了 HT-70/FC-72 混合介质的布里渊线宽、声子寿命和增益系数随 FC-72 体积分数的变化关系, 并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. 结果表明, HT-70/FC-72 混合介质的 SBS 参数随 FC-72 体积分数的单调变化, 不出现极值现象. 混合介质的选用不仅增加了 SBS 介质的种类, 而且能够满足 SBS 系统对不同介质的需求.

关键词: 受激布里渊散射, 混合介质, SBS 参数

PACC: 4265C, 4265F

## 1. 引 言

由于受激布里渊散射(SBS)具有相位共轭特性, 能够消除光传输过程中的相位畸变, 提高光束质量<sup>[1]</sup>, 因此多年来 SBS 相位共轭一直被广泛地研究<sup>[2]</sup>. 大量研究表明介质对 SBS 性能有很大的影响, 寻找出理想的介质是进一步提高 SBS 性能的重要环节. 虽然 SBS 液体介质的种类繁多, 但是大部分液体介质的应用受到一定的限制. 这是因为, 首先现有大部分介质的吸收系数过大<sup>[3,4]</sup>, 进而导致 SBS 系统的能量反射率过低. 其次虽然少数几种介质的吸收系数较小, 但是负载能力过低<sup>[5]</sup>, 容易出现光学击穿现象, 进而降低 SBS 系统的性能<sup>[6]</sup>. 文献[7]提出了双池 SBS 系统中选用混合介质的方案, 即放大池中选用吸收系数小的单元介质, 振荡池中选用光学击穿阈值高, 并且布里渊频移与放大池单元介质相同的混合介质, 进而明显提高了双池 SBS 系统性能. 但是文献[7]只研究了混合介质的布里渊频移随混合比的变化, 而没有研究其他 SBS 参数(例如布里渊线宽、声子寿命、增益系数、吸收系数和光学击穿阈值

等)随混合比的变化关系. 显然, 混合介质的其他 SBS 参数也随混合比不断变化, 因此研究其他 SBS 参数随混合比的变化关系是选用混合介质的必要前提条件.

本文从混合介质的折射率、声速、黏度和密度等物理量随混合比的变化关系入手, 推导出了混合介质的布里渊线宽、声子寿命和增益系数等 SBS 参数随混合比的变化关系. 数值模拟了 HT-70/FC-72 混合介质的布里渊线宽、声子寿命和增益系数随 FC-72 体积分数的变化关系, 并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. 结果表明, HT-70/FC-72 混合介质的 SBS 参数随 FC-72 体积分数的单调变化, 不出现极值现象. 混合介质的选用不仅增加了 SBS 介质的种类, 而且能够满足 SBS 系统对不同介质的需求.

## 2. 理论分析

### 2.1. 混合介质的布里渊线宽和声子寿命随混合比的变化关系

介质的布里渊线宽由以下方程表示<sup>[8,9]</sup>:

\* 国家自然科学基金(批准号: 60778019, 10476009, 60478020), 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.

† E-mail: zw\_lu@sohu.com

$$\Gamma = \frac{16\pi^3 n^2 \eta}{\lambda^2}, \quad (1)$$

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

从方程 (1) 可知, 当入射光波长确定时, 只要求出混合介质的折射率和运动黏度随混合比的变化关系, 即可算出混合介质的布里渊线宽随混合比的变化关系。

混合介质的折射率随混合比的变化关系由以下方程表示<sup>[10]</sup>:

$$n = \left\{ \frac{1 + \chi \varphi_1 \rho_1 + \varphi_2 \rho_2 \left[ \frac{\varphi_1 (n_1^2 - 1)}{\rho_1 (n_1^2 + 2)} + \frac{\varphi_2 (n_2^2 - 1)}{\rho_2 (n_2^2 + 2)} \right]}{1 - (\varphi_1 \rho_1 + \varphi_2 \rho_2) \left[ \frac{\varphi_1 (n_1^2 - 1)}{\rho_1 (n_1^2 + 2)} + \frac{\varphi_2 (n_2^2 - 1)}{\rho_2 (n_2^2 + 2)} \right]} \right\}^{1/2}, \quad (2)$$

式中  $n_1, n_2$  分别为二单体的折射率,  $\rho_1, \rho_2$  分别为二单体的密度,  $\varphi_1, \varphi_2$  分别为二单体的体积分数,  $\varphi_1 = V_1 / (V_1 + V_2)$ ,  $\varphi_2 = V_2 / (V_1 + V_2)$ , 其中  $V_1, V_2$  分别为二单体的体积。

不缔合混合介质的运动黏度由以下方程表示<sup>[11]</sup>:

$$\eta = 10^{(x_1 \lg \eta_1 + x_2 \lg \eta_2)}, \quad (3)$$

式中  $x_1, x_2$  分别为二单体的摩尔分数,  $\eta_1, \eta_2$  分别为二单体的运动黏度。

把方程 (2) 和 (3) 代入方程 (1) 就可得到混合介质的布里渊线宽随混合比 (各组分体积分数、摩尔分数和质量分数) 的变化关系为

$$\Gamma = \frac{16\pi^3 10^{(x_1 \lg \eta_1 + x_2 \lg \eta_2)}}{\lambda^2} \times \left\{ \frac{1 + \chi \varphi_1 \rho_1 + \varphi_2 \rho_2 \left[ \frac{\varphi_1 (n_1^2 - 1)}{\rho_1 (n_1^2 + 2)} + \frac{\varphi_2 (n_2^2 - 1)}{\rho_2 (n_2^2 + 2)} \right]}{1 - (\varphi_1 \rho_1 + \varphi_2 \rho_2) \left[ \frac{\varphi_1 (n_1^2 - 1)}{\rho_1 (n_1^2 + 2)} + \frac{\varphi_2 (n_2^2 - 1)}{\rho_2 (n_2^2 + 2)} \right]} \right\}. \quad (4)$$

介质的布里渊线宽  $\Gamma$  与其声子寿命  $\tau$  之间的关系表示为<sup>[12]</sup>

$$\tau = \frac{1}{\pi \Gamma}. \quad (5)$$

从方程 (5) 可知, 只要算出混合介质的布里渊线宽随混合比的关系, 就可推导出混合介质的声子寿命随混合比的变化关系。

## 2.2. 混合介质的增益系数随混合比的变化关系

介质的增益系数表示为<sup>[8, 12]</sup>

$$g = \frac{\gamma^2}{4\pi^2 c n^3 v \eta \rho}, \quad (6)$$

式中  $\gamma$  为介质的电致伸缩系数,  $n$  为介质的折射率,  $\gamma$  与  $n$  的关系近似为  $\gamma = \frac{1}{3}(n^2 - 1)(n^2 + 2)$ ,  $c$  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。

弱相互作用的二元混合介质声速表达式为<sup>[13]</sup>

$$v = \frac{M_1 X_1 / \rho_1 + M_2 X_2 / \rho_2}{\sqrt{(M_1 X_1 + M_2 X_2) \left[ \frac{M_1 X_1 / \rho_1^2 v_1^2}{M_1 X_1 / \rho_1^2 v_1^2} + \frac{M_2 X_2 / \rho_2^2 v_2^2}{M_2 X_2 / \rho_2^2 v_2^2} \right]}}, \quad (7)$$

式中  $M_1, M_2$  分别为二单体的分子量,  $X_1, X_2$  分别为二单体的摩尔分数,  $\rho_1, \rho_2$  分别为二单体的密度,  $v_1, v_2$  分别为二单体的声速。

若混合介质各组份在混合前、后体积没有变化, 则其密度表示为<sup>[11]</sup>

$$\rho = \frac{\rho_1 \rho_1}{a_1 \rho_2 + a_2 \rho_1}, \quad (8)$$

式中  $\rho_1, \rho_2$  分别为二单体的密度,  $a_1, a_2$  分别为二单体的质量分数。

把方程 (2) (3) (7) 和 (8) 代入方程 (6) 就可得到混合介质增益系数随混合比 (各组分体积分数和摩尔分数) 的变化关系为

$$g = \frac{\gamma^2 \sqrt{(M_1 X_1 + M_2 X_2) \left[ \frac{M_1 X_1 / \rho_1^2 v_1^2}{M_1 X_1 / \rho_1^2 v_1^2} + \frac{M_2 X_2 / \rho_2^2 v_2^2}{M_2 X_2 / \rho_2^2 v_2^2} \right]}{4\pi^2 c (M_1 X_1 / \rho_1 + M_2 X_2 / \rho_2) 10^{(x_1 \lg \eta_1 + x_2 \lg \eta_2)} \rho_1 \rho_2} \times \left\{ \frac{1 - (\varphi_1 \rho_1 + \varphi_2 \rho_2) \left[ \frac{\varphi_1 (n_1^2 - 1)}{\rho_1 (n_1^2 + 2)} + \frac{\varphi_2 (n_2^2 - 1)}{\rho_2 (n_2^2 + 2)} \right]}{1 + \chi \varphi_1 \rho_1 + \varphi_2 \rho_2 \left[ \frac{\varphi_1 (n_1^2 - 1)}{\rho_1 (n_1^2 + 2)} + \frac{\varphi_2 (n_2^2 - 1)}{\rho_2 (n_2^2 + 2)} \right]} \right\}^{2/3}. \quad (9)$$

### 3. HT-70/FC-72 混合介质的 SBS 参数随 FC-72 体积分数的变化曲线

#### 3.1. 混合介质的 SBS 参数随混合比变化的数值模拟曲线

HT-70 和 FC-72 均为非极性分子<sup>[14,15]</sup>, 它们的

混合成为弱相互作用混合液, 因此 HT-70/FC-72 混合介质的布里渊线宽、声子寿命和增益系数随混合比的变化关系可分别由方程(4)(5)和(9)算出. 图 1 是根据上述关系算出的 HT-70/FC-72 混合介质的布里渊线宽、声子寿命和增益系数随 FC-72 体积分数的变化曲线. 表 1 列出了 HT-70 和 FC-72 介质的 SBS 参数<sup>[16,17]</sup>.

表 1 HT-70 和 FC-72 介质的 SBS 参数

	$n$	$M$	$v/m \cdot s^{-1}$	$\rho/g \cdot cm^{-3}$	$\alpha/cm^{-1}$	$\nu/MHz$	$\Gamma/MHz$	$g/cm \cdot GW^{-1}$	$\tau/ns$	$\eta/10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$	OPT/GW $\cdot cm^{-2}$
HT-70	1.280	410	484	1.68	$< 10^{-3}$	1166	353	5.7	0.9	0.50	$> 100$
FC-72	1.251	340	468	1.68	$< 10^{-3}$	1100	270	6.2	1.2	0.40	$> 100$

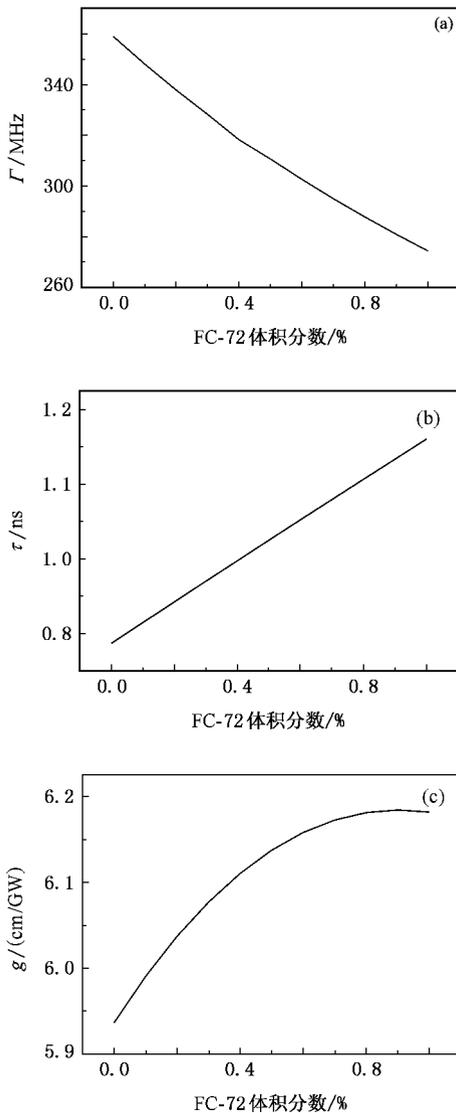


图 1 HT-70/FC-72 混合介质的 (a) 布里渊线宽 (b) 声子寿命, (c) 增益系数随 FC-72 体积分数的变化数值模拟曲线

从图 1 可看出, HT-70/FC-72 混合介质的布里渊线宽、声子寿命和增益系数随 FC-72 体积分数单调变化. HT-70 和 FC-72 均为非极性分子, 它们的混合不会引起分子之间的相互作用, 只是起互相稀释作用, 因此不出现极值现象<sup>[18]</sup>. 另外, 混合介质的布里渊线宽随 FC-72 体积分数增加而降低, 而声子寿命和增益系数随 FC-72 体积分数增加而升高. 这是因为, HT-70 的布里渊线宽比 FC-72 大, 因此随着 FC-72 体积分数的增加混合介质的布里渊线宽降低; 而 HT-70 的声子寿命和增益系数均比 FC-72 小, 因此随着 FC-72 体积分数的增加混合介质的声子寿命和增益系数均升高.

#### 3.2. HT-70/FC-72 混合介质的吸收系数和光学击穿阈值的测量

混合介质的吸收系数和光学击穿阈值 (OPT) 是无法数值模拟, 因此只能实验上直接测量. 实验装置与文献 5 的实验装置相同, 其中吸收系数是根据吸收定律测量, 光学击穿阈值是通过观察闪光或火花的概率来确定 (定义为介质内可见闪光或火花出现的概率 50% 时的输入光功率密度). 实验结果表明, HT-70/FC-72 混合介质的吸收系数和光学击穿阈值随 FC-72 体积分数的变化很小, 几乎是恒定值. 这是因为, HT-70 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变化. 可以预测, 若混合介质中两种组分的吸收系数和光学击穿阈值有一定的差异, 那么其吸收系数和光学击穿阈值也随混合比不断变化.

## 4. 结 论

从混合介质的折射率、声速、黏度和密度等物理量随混合比的变化关系入手,推导出了混合介质的布里渊线宽、声子寿命和增益系数等 SBS 参数随混合比的变化关系.理论上计算了 HT-70/FC-72 混合介质的布里渊线宽、声子寿命和增益系数随 FC-72

体积分数的变化关系,实验上测量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.结果表明,HT-70/FC-72 混合介质的布里渊线宽、声子寿命和增益系数等 SBS 参数随 FC-72 体积分数单调变化,不出现极值现象,而其吸收系数和光学击穿阈值随 FC-72 体积分数的变化很小,几乎是恒定值.混合介质的选用不仅增加了 SBS 介质的种类,而且能够满足 SBS 系统对不同介质的需求.

- [ 1 ] Zel'dovich B Y, Popovichev V I, Ragul'skii V V, Faizullov F S 1972 *JETP Lett.* **15** 109
- [ 2 ] Grofts G J, Damzen M J, Lamb R A 1991 *J. Opt. Soc. Am.* **B 8** 2282
- [ 3 ] Hasi W L J, Lu Z W, He W M 2003 *Laser Technology* **27** 304 (in Chinese)[ 哈斯乌力吉、吕志伟、何伟明 2003 激光技术 **27** 304 ]
- [ 4 ] Hasi W L J, Lu Z W, Li Q, Ba D X, He W M 2007 *Sci. Chin. Ser G* **50** 144
- [ 5 ] Hasi W L J, Lu Z W, He W M, Wang S Y 2004 *Chin. Opt. Lett.* **2** 718
- [ 6 ] Eichler H J, Menzel R, Sander R, Smandek B 1992 *Opt. Commun.* **89** 260
- [ 7 ] Hasi W L J, Lu Z W, Li Q, He W M 2007 *Chin. Phys.* **16** 1385
- [ 8 ] 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 ]
- [ 9 ] Boyd R W 1992 *Nonlinear Optics* (1st Edition) (New York: Academic Press) p347—349
- [ 10 ] Yang A L, Yang J G 1998 *Laser Journal* **19** 13 (in Chinese)[ 杨爱玲、杨静国 1998 激光杂志 **19** 13 ]
- [ 11 ] Lu M J, Zhang H Q 2006 *Chemical Engineering Principle* (2nd Edition) (Beijing: Chemical Industry Press) p13 (in Chinese)[ 陆美娟、张浩勤 2006 化工原理(第二版)(北京:化学工业出版社)第 13 页]
- [ 12 ] Erokhin A I, Kovalev V I, Faizullov F S 1986 *Sov. J. Quantum Electron.* **16** 872
- [ 13 ] Zhang J J 1985 *Acta Acustica* **10** 190 (in Chinese)[ 张俊杰 1985 声学学报 **10** 190 ]
- [ 14 ] Zeng Z Q, Zhang Z Q, Su Y C, Liang Z C, Wang Y W 1996 *Organic Chemistry* (Beijing: Higher Education Press) p250 (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 250 页]
- [ 15 ] Hasi W L J, Lu 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 ]
- [ 16 ] Yoshida H, Kmetik V, Fujita H, Nakatsuka M, Yamanaka T, Yoshida K 1997 *Appl. Opt.* **36** 3739
- [ 17 ] Park H, Lim C, Yoshida H, Nakatsuka M 2006 *Jpn. J. Appl. Phys.* **45** 5053
- [ 18 ] Zhu D, Zhang P X, Zhou Z B, Yang J G 1989 *Acta Phys. Sin.* **38** 683 (in Chinese)[ 朱 丹、张鹏翔、周仲壁、杨静国 1989 物理学报 **38** 683 ]

# Study on variations of stimulated Brillouin scattering parameters of mixed media with mixing ratio<sup>\*</sup>

Hasi Wu-Li-Ji<sup>1,2)†</sup> Li Zhi-Wei<sup>2)†</sup> Liu Shu-Jie<sup>2)</sup> He Wei-Ming<sup>2)</sup> Zhao Xiao-Yan<sup>2)</sup> Zhang Wei<sup>1)</sup>

<sup>1</sup> *Space Optical Engineering Research Centre, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*

<sup>2</sup> *National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*

( Received 26 July 2007 ; revised manuscript received 17 September 2007 )

## Abstract

From the relation between the refractive index, viscosity, density, sound velocity and mixing ratio of mixed medium, we deduce the variation of SBS parameters, namely the Brillouin linewidth, phonon lifetime and gain coefficient, with mixing ratio. For the HT-70/FC-72 mixture, the variations of Brillouin linewidth, phonon lifetime and gain coefficient with mixing ratio are numerically simulated, and the variations of absorption coefficient and optic breakdown threshold with mixing ratio are measured in experiment. The results show that the SBS parameters exhibit a monotonic variation with mixing ratio without extrema. The use of mixed medium not only diversifies SBS medium but also optimizes the SBS system.

**Keywords** : stimulated Brillouin scattering, liquid mixture, SBS parameter

**PACC** : 4265C, 4265F

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 60778019, 10476009, 60478020 ), 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