

受激布里渊散射新介质——全氟胺的研究*

哈斯乌力吉^{1)†} 吕志伟^{2)†} 公 胜²⁾ 何伟明²⁾ 林殿阳²⁾ 张 伟¹⁾

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)

(2008 年 1 月 4 日收到, 2008 年 2 月 29 日收到修改稿)

本文从介质化学结构与受激布里渊散射(SBS)特性的关系入手,寻找出了 SBS 特性良好的全氟胺系列新介质——FC-131、FC-3283、FC-40、FC-43、FC-70 等,并测定或计算出了新介质的 SBS 参数.结果表明,新介质的吸收系数均小于 10^{-3} cm^{-1} ,光学击穿阈值均高于 100 GW/cm^2 .全氟胺系列新介质不仅具有良好的 SBS 特性,而且还具有无毒、低挥发性和高稳定性等一系列独特的物理化学性质.新介质的发现不仅增加 SBS 介质的种类,而且能够有效提高 SBS 系统的性能,对于 SBS 相位共轭镜在高功率激光系统中的应用打下了良好的基础.

关键词:受激布里渊散射(SBS),全氟胺,吸收系数,光学击穿阈值

PACC:4265C,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,SBS 相位共轭技术以成为人们在非线性光学领域的重要研究对象^[1-3].大量研究表明,介质对 SBS 特性有很大的影响,寻找出理想的介质是进一步提高 SBS 特性的重要环节.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了一定的限制.这是因为现有大部分介质的吸收系数过大^[4],进而降低了 SBS 系统的能量反射率;另外虽然少数几种介质的吸收系数较小,但是负载能力过低,产生严重的光学击穿现象,进而降低了 SBS 系统的特性^[5,6].寻找出低吸收、高负载的 SBS 介质是进一步提高 SBS 特性的首要因素,也是 SBS 相位共轭镜在高功率激光系统中应用的重要前提.

1997 年 Yoshida 等^[7]寻找出了低吸收、高负载的 SBS 新介质——全氟烷烃(FC-72)和全氟环醚(FC-75),把 SBS 系统的负载能力提高到 100 GW/cm^2 以上.他们的研究主要集中在 FC-72 和 FC-75 的物理化学特性和 SBS 特性上,而对其化学结构与 SBS

特性的关系几乎没有进行研究.本文从介质化学结构与 SBS 特性的关系入手,寻找出了另一类 SBS 特性良好的新介质——全氟胺,包括全氟三乙胺(FC-131)、全氟三丙胺(FC-3283)、混合全氟胺(FC-40)、全氟三丁胺(FC-43)和全氟三戊胺(FC-70)等,并测定或计算了新介质的吸收系数、光学击穿阈值、增益系数、布里渊线宽和声子寿命等 SBS 参数.结果表明,以上新介质的吸收系数均小于 10^{-3} cm^{-1} ,光学击穿阈值均高于 100 GW/cm^2 ,表现出了良好的 SBS 特性.另外,新介质还具有无毒、低挥发性和高稳定性等一系列独特的物理化学性质,对 SBS 的实验研究提供了诸多便利.全氟胺系列新介质的发现不仅增加了 SBS 介质的种类,而且能够有效提高 SBS 系统的负载能力,对于 SBS 相位共轭镜在高功率激光系统中的应用打下了良好的基础.

2. 全氟胺的物理化学特性

胺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)称为全氟胺.由于氟元素的电负性最大,C—F 键的键能很高(480—530 kJ/mol),所以全氟胺

* 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.

† 通讯联系人. E-mail: zw_lu@sohu.com

具有很高的化学惰性和热稳定性^[8]. 全氟胺分子通式为 $(C_n F_{2n+1})_3 N$, 分子中 n 越大, 相对分子量就越大, 分子之间的色散力就越大. 因此, 一般 $n \approx 1$ 时为气体, $2-5$ 时为液体, 大于 6 时为固体^[9]. 例如, 全氟三甲胺是气体, 全氟三乙胺、全氟三丙胺、全氟三丁胺和全氟三戊胺是液体, 而全氟三己胺是固体.

表 1 全氟胺的物理化学特性

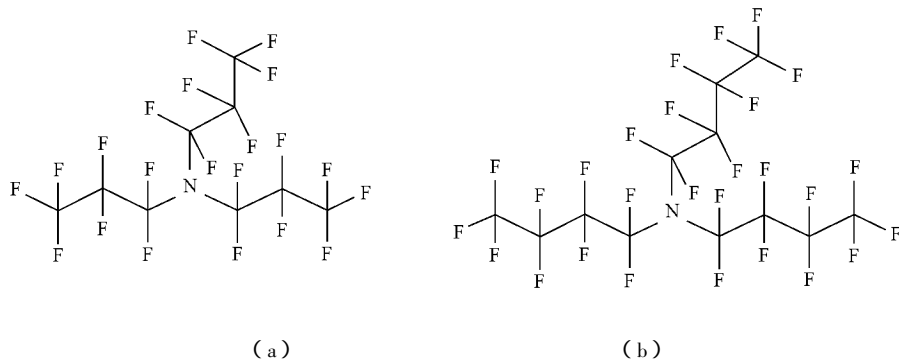
全氟胺	商业名称	分子式	沸点/°C	黏度/ $10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$	分子量	折射率	密度/ $g \cdot cm^{-3}$
全氟三乙胺	FC-131	$(C_2 F_5)_3 N$	67	0.52	371	1.262	1.74
全氟三丙胺	FC-3283	$(C_3 F_7)_3 N$	128	0.75	521	1.281	1.82
全氟三丁胺	FC-40	$(C_4 F_9)_3 N$	155	1.80	650	1.290	1.85
+ 全氟二丁基甲胺		+ $(C_4 F_9)_2 NCF_3$					
全氟三丁胺	FC-43	$(C_4 F_9)_3 N$	174	2.50	670	1.291	1.86
全氟三戊胺	FC-70	$(C_5 F_{11})_3 N$	215	14.0	820	1.303	1.94

介质对近红外区(对于波长为 1064 nm 的激光)的吸收主要是 $X-H$ (X 代表 C, N, O, S, P) 的倍频(对应于分子振动状态在相隔一个或几个振动能级之间的跃迁)和合频(对应于分子两种振动状态的能级同时发生跃迁)的吸收^[10]. 全氟胺分子当中含 $C-C, C-N$ 和 $C-F$ 化学键, 而不含 $X-H, N-H, O-H, S-H$ 和 $P-H$ 等化学键, 因此它们对红外光的吸收率很小.

介质分子所含元素的电离能、电子亲和能、电负

商业上一般用 FC (perfluorocarbons) 后加数字的来表示全氟胺, 如, $FC-131, FC-3283, FC-43, FC-70$ 等, 如表 1 所列. 另外, 除了上述单元全氟胺之外, 还有一些由不同的全氟胺组成的混合全氟胺, 如全氟三丁胺和全氟二丁基甲胺混合而成的混合全氟胺(perfluoro-compound), 其商业名称为 $FC-40$.

性、价电子数目和化学键能等对介质光学击穿阈值都有一定的影响. 但是实验结果表明, 分子中外层原子对内部化学键的保护作用对介质光学击穿阈值的影响最大^[11]. 全氟胺的光学击穿阈值一般都很高, 这是因为氟是半径最小的原子, 其范德瓦耳斯半径为 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^[9]. 图 1 列出了 $FC-3283$ 和 $FC-43$ 的分子结构.

图 1 分子结构示意图 (a) $FC-3283$ (b) $FC-43$

3. 全氟胺的 SBS 特性

3.1. 实验装置

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, 并入射到 SBS 系统中. SBS 系统由

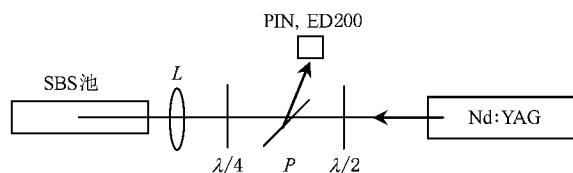


图 2 实验装置示意图

振荡池(池长为 60 cm)和透镜 L (焦距为 30 cm)组

成,抽运光首先被透镜 L 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.抽运光、透射光和 Stokes 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.

3.2. 全氟胺新介质 SBS 参数的确定和 SBS 特性的研究

实验时 Nd:YAG 激光器输出抽运光波长为 1064 nm,重复率为 1 Hz,脉宽为 6 ns,发散角为 0.15

mrad(5 倍衍射极限),抽运光能量的变化通过调节 $1/2$ 波片而实现.首先测定了表 1 中所有全氟胺系列新介质的吸收系数和光学击穿阈值,然后用小信号方法测定了新介质的增益系数^[12-14],如表 2 所列.布里渊频移、布里渊线宽和声子寿命由文献^[15-18]的公式计算而得.从表 2 可以看出,全氟胺系列新介质的吸收系数均小于 10^{-3} cm^{-1} ,而光学击穿阈值均高于 100 GW/cm^2 .

实验中还发现,全氟胺系列新介质不仅具有良好的 SBS 特性,而且还具有无色、无味、无毒、低挥发性和高稳定性等一系列独特的物理化学性质^[19],这对 SBS 的实验研究提供了诸多便利.

表 2 全氟胺系列新介质的 SBS 参数

	吸收系数/ cm^{-1}	光学击穿阈值/ $\text{GW} \cdot \text{cm}^{-2}$	增益系数/ $\text{cm} \cdot \text{GW}^{-1}$	布里渊频移/MHz	布里渊线宽/MHz	声子寿命/ns
FC-131	$< 10^{-3}$	> 100	6.2	1196	355	0.9
FC-3283	$< 10^{-3}$	> 100	4.2	1281	554	0.6
FC-40	$< 10^{-3}$	> 100	3.8	1386	1292	0.2
FC-43	$< 10^{-3}$	> 100	3.6	1420	1800	0.2
FC-70	$< 10^{-3}$	> 100	1.8	1540	9000	0.1

图 3 是 FC-43 和 FC-70 两种介质的 SBS 能量反射率随抽运光能量的变化曲线.可以看出,随着抽运光能量的提高,SBS 反射率先是迅速上升,然后缓慢上升.这是因为抽运光能量越高,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 为抽运光功率密度, L 为有效作用长度)越大,会导致更多的抽运光能量向 Stokes 光能量转移,因此 SBS 反射率迅速提高.但是,抽运光能量

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^[20-22].从图 3 还可以看出,FC-43 的 SBS 能量反射率比 FC-70 高,这是因为 FC-43 的增益系数比 FC-70 的高.

4. 结 论

从介质化学结构与 SBS 性能的关系入手,寻找出了低吸收高负载的全氟胺系列新介质——FC-131、FC-3283、FC-40、FC-43 和 FC-70 等.分析了全氟胺的化学结构,并解释了全氟胺具有低吸收、高负载特性的原因.测定或计算了以上全氟胺系列新介质的吸收系数、光学击穿阈值、增益系数、布里渊频移、布里渊线宽和声子寿命等 SBS 参数.结果表明,新介质的吸收系数均小于 10^{-3} cm^{-1} ,光学击穿阈值均高于 100 GW/cm^2 ,表现出了优异的 SBS 特性.另外,新介质还具有无毒、低挥发性和高稳定性等一系列独特的物理化学性质.新介质的发现不仅增加 SBS 介质的种类,而且能够有效提高 SBS 系统的负载能力,这对 SBS 相位共轭镜在高功率激光系统中的应用打下了良好的基础.

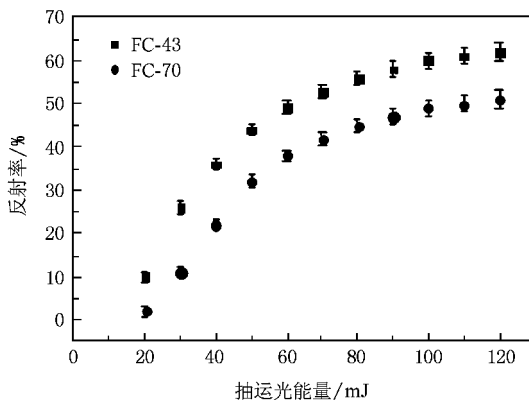


图 3 FC-43 和 FC-70 新介质的 SBS 能量反射率随抽运光能量变化的实验曲线

- [1] Grofts G J , Damzen M J , Lamb R A 1991 *J. Opt. Soc. Am. B* **8** 2282
- [2] 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]
- [3] Hasi W L J , Lü Z W , Li Q , He W M 2007 *Laser and Partiole Beam* **25** 207
- [4] Hasi W L J , Lü Z W , Li Q , Ba D X , He W M 2007 *Science in China (Series G)* **50** 144
- [5] Wang X H , Lü Z W , Lin D Y , Wang C , Zhao X Y , Tang X Z , Zhang H F , Shan Y S 2004 *Chin. Phys.* **13** 1733
- [6] Hasi W L J , Lü Z W , Li Q , He W M 2007 *Chin. Phys.* **16** 1385
- [7] Yoshida H , Kmetik V , Fujita H , Nakatsuka M , Yamanaka T , Yoshida K 1997 *Appl. Opt.* **36** 3739
- [8] Wang E R , Wang K , Cao X G 2004 *Organo-Fluorine Induatry* **1** 13 (in Chinese) [王恩仁、王 奎、曹学贵 2005 有机氟工业 **1** 13]
- [9] 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]
- [10] 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]
- [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] Chen J 1999 *Optics Phase Conjugation and Application* (Beijing : Science Press) p125 (in Chinese) [陈 军 1999 光学位相共轭及其应用 (北京 : 科学出版社) 第 125 页]
- [13] Jones D C 1997 *Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials* **6** 69
- [14] Harsi W L J , Lü Z W , Gong S , Li Q , He W M 2008 *Appl. Opt.* **47** 1010
- [15] Erokhin A I , Kovalev V I , Faizullof F S 1986 *Sov. J. Quantum Electron.* **16** 872
- [16] 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]
- [17] Park H , Lim C , Yoshida H , Nakatsuka M 2006 *Jpn. J. Appl. Phys.* **45** 5053
- [18] 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]
- [19] 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]
- [20] Hasi W L J , Lü Z W , Li Q , Ba D X , He W M 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1385 (in Chinese) [哈斯乌力吉、吕志伟、李 强、巴德欣、何伟明 2007 物理学报 **56** 1385]
- [21] Wang X H , Lü Z W , Lin D Y , Wang C , Tang X Z , Gong K , Shan Y S 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1224 (in Chinese) [王晓慧、吕志伟、林殿阳、王 超、汤秀章、龚 昆、单玉生 2006 物理学报 **55** 1224]
- [22] 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、滕云鹏、何伟明、赵晓彦 2008 物理学报 **57** 1709]

New SBS media——perfluorinated amines^{*}

Hasi Wu-Li-Ji^{1,2)} Lü Zhi-Wei²⁾† Gong Sheng²⁾ He Wei-Ming²⁾ Lin Dian-Yang²⁾ Zhang Wei¹⁾

¹ *Space Optical Engineering Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*

² *National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*

(Received 4 January 2008 ; revised manuscript received 29 February 2008)

Abstract

The stimulated Brillouin scattering (SBS) media perfluorinated amines with good SBS characteristics have been discovered based on the dependence of SBS characteristics on the chemical structures. The SBS parameters of perfluorinated amines such as FC-131, FC-3283, FC-40, FC-43 and FC-70 have been measured or calculated. The results demonstrate that their absorption coefficients are below 10^{-3} cm^{-1} and optical breakdown thresholds are above 100 GW/cm^2 . The perfluorinated amines also exhibit a series of unique physicochemical properties, i. e., non-toxic property, low volatility, and high stability. The discovery not only diversifies the SBS media, but also improves the performance of SBS system, thereby laying a good foundation for the application of SBS phase conjugation mirror in high-power laser systems.

Keywords : stimulated Brillouin scattering (SBS), perfluorinated amine, absorption coefficient, optical breakdown threshold

PACC : 4265C, 4265F

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60778019, 10476009, 60478020), the National Science Foundation for Post-doctoral Scientists of China (Grant No. 20060390795), and the Program of Excellent Team in Harbin Institute of Technology of China.

[†] Corresponding author. E-mail : zw_lu@sohu.com