

# 杂质颗粒对受激布里渊散射介质 光学击穿阈值影响的研究\*

哈斯乌力吉<sup>†</sup> 王雪阳 郭翔宇 仲召明 范瑞清 林殿阳 何伟明 吕志伟<sup>‡</sup>

(哈尔滨工业大学可调谐(气体)激光技术国家级重点实验室, 哈尔滨 150080)

(2011年11月8日收到; 2011年12月21日收到修改稿)

建立了受激布里渊散射介质中热作用破坏的物理模型, 数值模拟了杂质颗粒的温度随其半径的变化曲线. 结果显示, 杂质颗粒存在一个最大热作用半径, 介质所含颗粒的尺寸在此半径附近时, 介质最容易发生光学击穿现象, 其光学击穿阈值最低. 在 Continuum Nd: YAG 种子注入式激光系统中, 选取 FC-3283, GF-180 和 HFE-7100 介质, 通过不同孔径的过滤膜进行过滤, 并研究了过滤前后的光学击穿阈值和能量反射率. 结果表明, 随着过滤孔径的变小, 介质光学击穿阈值逐渐提高, 且过滤之后介质的能量反射率有了明显的提高. 介绍了一种利用 He-Ne 激光透射光光斑变化来判断是否发生光学击穿现象的方法, 该方法具有方便、准确的特点, 可有效地减小由于肉眼观测引起的误差.

**关键词:** 受激布里渊散射介质, 杂质颗粒, 光学击穿阈值

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

## 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, 因此多年来 SBS 相位共轭受到广泛研究<sup>[1-6]</sup>. 大量研究表明, 介质光学击穿现象对 SBS 特性有很大的影响, 提高介质光学击穿阈值是 SBS 相位共轭镜在高功率激光系统中应用的重要前提条件. 除了介质本身的化学特性之外, 杂质颗粒是影响其光学击穿阈值的重要因素. 若液体 SBS 介质中存在微米级杂质颗粒时, 在入射光与介质相互作用区域内, 介质材料的结构缺陷或杂质吸热成为热沉积的主要因素. 通常, 杂质颗粒与介质材料本身具有不同的热传导系数, 当抽运光照射时, 杂质颗粒吸收光能量, 温度迅速升高, 并通过热传导向四周散热. 若热积累作用强于热扩散作用, 能量不断沉积, 围绕杂质颗粒周围形成高温高压的热团, 质心温度达到某一临界值时, 便会以电离或微爆(微颗粒被破坏或汽化)方式释放多余热量<sup>[7]</sup>, 即发生

光学击穿现象, 进而影响 SBS 相位共轭镜的相位保真度及能量反射率等性能<sup>[8-12]</sup>.

本文建立了 SBS 介质中热作用破坏的物理模型, 并数值模拟了杂质粒子的温度随其半径的变化曲线. 结果显示, 杂质颗粒存在一个最大热作用半径, 介质所含颗粒的尺寸在此半径附近时, 介质最容易发生光学击穿现象, 其光学击穿阈值最低. 在 Continuum Nd: YAG 种子注入式激光系统中, 选取 FC-3283, GF-180 和 HFE-7100 介质, 通过不同孔径的过滤膜进行过滤, 并研究了过滤前后的光学击穿阈值和能量反射率. 结果表明, 随着过滤孔径的变小, 介质光学击穿阈值逐渐提高, 且过滤之后能量反射率有了明显的提高. 另外, 本文还介绍了一种利用 He-Ne 激光透射光光斑变化来判断是否发生光学击穿现象的方法, 该方法具有方便、准确的特点, 可有效地减小由于肉眼观测引起的误差.

## 2 理论研究

对于高功率激光系统来说, 输出频率一般较低,

\* 国家自然科学基金(批准号: 61138005, 21071035)、新世纪优秀人才支持计划(批准号: NCET-08-0173)和中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: HIT.BRET2.20100/2)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: hasiwuliji@sohu.com

<sup>‡</sup> E-mail: zw.lu@sohu.com

脉冲间隔时间内, 辐照时间极短, 可以忽略介质热物性参数随时间的变化. 当短脉冲激光辐照物体时, 由于作用时间短, 热扩散尺度比激光辐照半径小得多, 横向热传导可以忽略, 短脉冲激光与固体靶的相互作用过程可以用一维热传导理论来处理<sup>[13]</sup>. 基于上述假设过程, 可以对热损伤产生的过程建模模拟.

用  $I$  表示抽运光强,  $\omega$  表示抽运光频率,  $K$  表示热导率,  $\rho$  为介质密度,  $C$  表示比热容, 由热力学相关知识可知, 介质的热扩散系数  $\chi$  和光学吸收系数  $\alpha$  满足如下关系:

$$\chi = \frac{K}{\rho C},$$

$$\alpha = \frac{-12nC\omega z}{c \cdot \text{Im} \left( \frac{n^2}{\varepsilon + n^2} \right)}, \quad (1)$$

式中,  $n$  为折射率,  $\varepsilon$  为介电常数,  $c$  为真空中光速. 将抽运脉冲的辐照阶段和辐照后的热扩散阶段一起进行讨论, 可以得到 SBS 相位共轭镜中介质的热传导方程<sup>[14]</sup>:

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \chi_1 \nabla^2 T_1$$

$$= \frac{K_1}{\rho_1 C_1} \frac{1}{z^2} \frac{\partial}{\partial z} \left( z^2 \frac{\partial T_1}{\partial z} \right)$$

$$z \geq r, t \geq 0, \quad (2)$$

式中,  $z$  为杂质颗粒的径向长度,  $r$  为杂质颗粒的半径. 假设杂质颗粒与介质的交界处温度相

等  $T_1 = T_2$  (下标 1 代表介质, 下标 2 代表杂质颗粒), 均用  $T$  表示, 且认为介质初始温度  $T_0$  与外界环境温度相同, 求解得:

$$T(z, t) = T_0 + \frac{2rT'}{z\pi^{1/2}}$$

$$\times \int_0^\infty \left\{ 1 - \exp \left[ -\frac{t}{\tau} \left( 1 - \frac{\beta^2}{\mu^2} \right) \right] \right\}$$

$$\times \exp(-\mu^2) d\mu. \quad (3)$$

利用边界条件  $z = r$ , 代入可得:

$$T_1(r, t) = T_0 + T' [1 - \exp(-t/\tau_1)], \quad (4)$$

$$T_2(r, t) = T_0 + T' [1 - \exp(-t/\tau_2)], \quad (5)$$

其中  $\beta = (z-r)\sqrt{4t\chi_1}$ ,  $\tau_1 = \frac{r^2 \rho_1 C_1}{3K_1}$ ,  $\tau_2 = \frac{r^2 \rho_2 C_2}{3K_1}$ ,

$$T' = \frac{\alpha r I}{4K_1}.$$

若知道 SBS 介质及杂质颗粒的相关参数 (如表 1 所示), 便可得到 SBS 过程中抽运辐照作用下介质的热积累情况. 分别以常用的 SBS 液体介质 FC-72 和固体介质融石英玻璃为例, 其中 FC-72 中的杂质多为封装过程中的浮尘, 而融石英玻璃 ( $\text{SiO}_2$ ) 中最常见的杂质为 Ti 离子, 多以氧化物形式存在, 即  $\text{TiO}_2$ . 杂质颗粒的尺寸均在 nm 级别, 约为 300 nm. 假设激光脉冲宽度为 8 ns, 能量密度 8 J/cm<sup>2</sup>, 则光强为 1 GW/cm<sup>2</sup>. 根据表 1 中所给出的数据值, 图 1 模拟出杂质温度随着杂质粒子半径变化的关系.

表 1 相关介质的物理参数<sup>[15]</sup>

	折射率	密度/kg·m <sup>-3</sup>	吸收系数/cm <sup>-1</sup>	介电常数	比热容/kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	热传导系数/W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
FC-72	1.25	1680	10 <sup>-5</sup>	1.75	1.1	0.057
SiO <sub>2</sub>	1.46	2210	10 <sup>-4</sup>	3.75	0.89	1.380
TiO <sub>2</sub>	1.33	4260	0.036	180	0.711	1.809

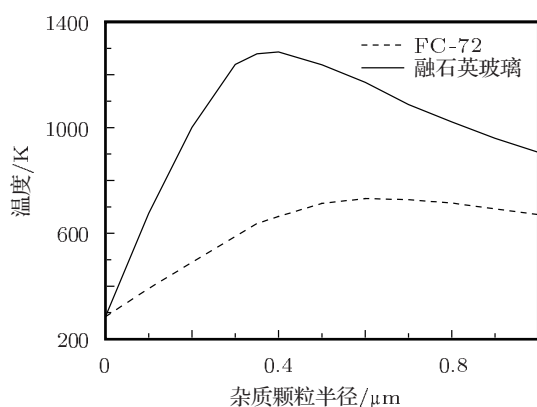


图 1 杂质颗粒温度随其半径的变化曲线

为了获取普遍应用意义的理论结果, 我们尝试用杂质颗粒的本征特性去表示其最大热作用半径. 将方程 (5) 左右两边同时对半径  $r$  求导:

$$\frac{dT_2(r, t)}{dr} = \frac{\alpha I}{4K_1} \left[ 1 - \left( 1 + \frac{8Dt}{r^2} \right) \right]$$

$$\times \exp(-4Dt/r^2), \quad (6)$$

假设  $D = \frac{3K_1}{4\rho_2 C_2}$ ,  $x = 4Dt/r^2$ , 则方程 (6) 可简化为

$$\frac{dT_2}{dr} = \frac{\alpha I}{4K_1} [1 - (1 + 2x)e^{-x}]. \quad (7)$$

由方程 (7) 可得具有普遍意义的最大热作用半径. 图 2 给出了介质材料的本征最大热作用半径,

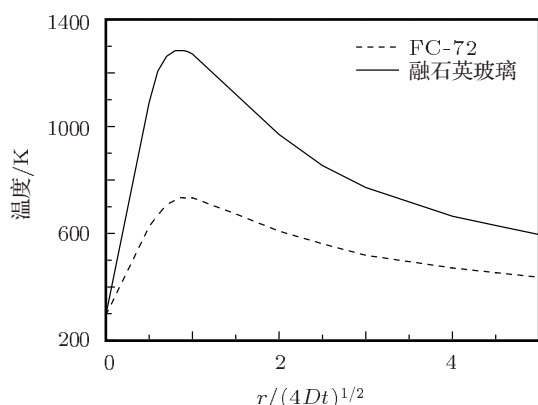


图2 介质材料的温度随其杂质颗粒半径的变化

即对给定的脉宽, 杂质有一个最容易被加热的尺寸, 约在  $r/2\sqrt{Dt} = 0.9$  处. 曲线在  $r = 2\sqrt{Dt}$  前迅速上升, 而之后逐渐下降. 从宏观热传递过程来讲, 半径太小的杂质虽然很容易被加热, 但热传导很快, 不易积累激光能量使温度升高; 而半径达到一定的大小后, 热传导可以忽略, 半径越大, 热传导面积越

大, 传输速度越快, 同时杂质升温需要的热量越多, 温度升高越不明显. 所以  $r/2\sqrt{Dt} \geq 1$  时, 杂质温度明显降低.

### 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, 经过分束镜 (BS) 后入射到 SBS 系统中. SBS 系统由 SBS 池和透镜组成, 入射光首先被透镜聚焦到振荡池中产生 SBS 作用, 并产生 Stokes 光. 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. 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. 实验时先对分束镜分光比进行标定, 然后通过  $1/2$  波片调节入射光能量, 用能量计 MIN-E1000 同时监测入射光、Stokes 光和透射光的能量.

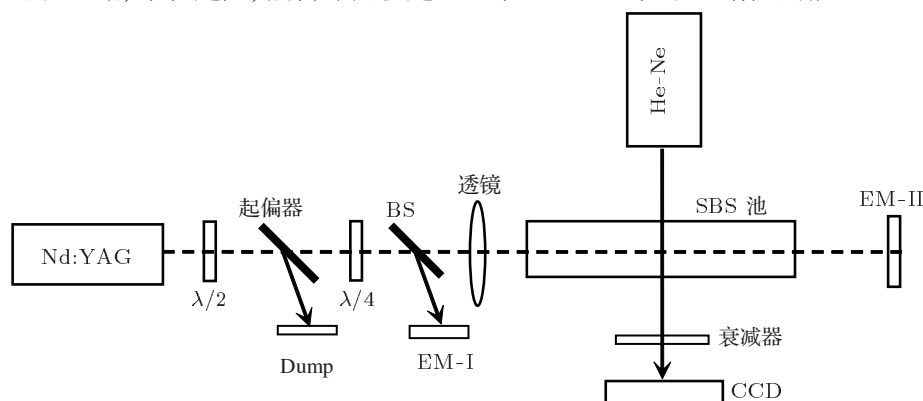


图3 实验装置示意图

实验时抽运光参数波长为 1064 nm, 重复频率为 2 Hz, 脉冲宽度为 7.6 ns, 发散角为 1.29 mrad, 透镜焦距为 15 cm, SBS 池长为 40 cm. 本文采用 He-Ne 激光透射光光斑变化来判断是否发生光学击穿现象. 用 He-Ne 光垂直照射 SBS 介质池侧面焦点处, 用 CCD 检测透射光光斑变化, 并根据光斑变化来判断介质中是否发生了光学击穿现象, 如图3所示. He-Ne 激光器原始光斑 (即未到达 SBS 介质池之前的光斑) 是一个近似圆形光斑, 如图4(a)所示; 当介质未发生光学击穿现象时, 透过 SBS 介质池之后的 He-Ne 光光斑不出现条纹状现象 (由于 SBS 介质池为一个圆柱形结构, 因此从侧面透过的光斑被径向拉长, 呈现出了椭圆形), 如图4(b)所示; 然而当介质发生光学击穿时, 透过 SBS 介质池之后

的 He-Ne 光光斑出现明显的条纹状现象, 如图4(c)所示, 这可能是发生光学击穿现象时介质中会出现波动所导致的. 该方法具有方便、准确的特点, 并可以实现实时监测, 可以和肉眼观测法结合使用.

目前性能良好的 SBS 介质是全氟碳和全氟聚醚系列化合物, 本文选用化学结构不同的 FC-3283, GF-180 和 HFE-7100 三种介质进行了研究. FC-3283 是全氟胺, 其分子式为  $(C_3F_7)_3N$ ; GF-180 是全氟聚醚, 其分子式为  $CF_3-[(O-CF-CF_3-CF_2)_n-(O-CF_2)_m]-O-CF_3$ , 其中  $n, m$  表示分子链长度的自然数; HFE-7100 是部分氟取代醚, 其分子式为  $C_4F_9OCH_3$ , 表1给出了其相关物理参数<sup>[16-20]</sup>. 用溶剂过滤器 (孔径分别为 0.1, 0.2, 0.45, 0.65 和 0.8  $\mu m$ )<sup>[10]</sup> 分别对 FC-3283, GF-

180 和 HFE-7100 三种介质进行过滤, 然后测定了其光学击穿阈值 (定义为介质内不出现光

学击穿现象时的最高入射光功率密度与出现光学击穿现象时的最低入射光功率密度的平均值).

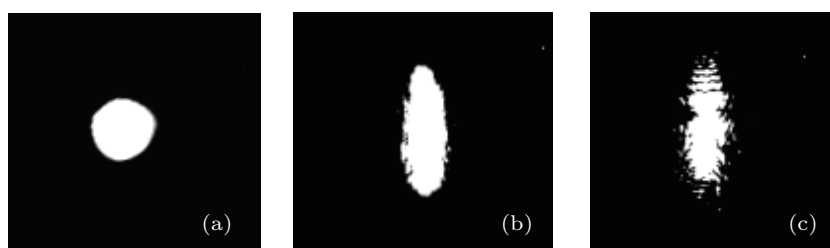


图4 He-Ne 激光器光斑变化示意图 (a) He-Ne 激光器原始光斑; (b) 未发生光学击穿时透过 SBS 介质池之后的光斑; (c) 发生光学击穿时透过 SBS 介质池之后的光斑

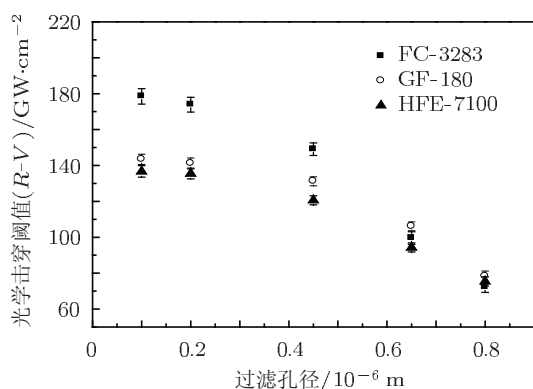


图5 不同介质的光学击穿阈值随过滤孔径变化的实验曲线

图5 是以上三种介质的光学击穿阈值随过滤孔径变化的实验曲线. 从图可以看出, 随着过滤孔径的变小, 介质光学击穿阈值逐渐提高. 其中 FC-3283 介质的光学击穿阈值提高幅度最

大, 由 70 GW/cm<sup>2</sup> 提高到 180 GW/cm<sup>2</sup>; GF-180 和 HFE-7100 介质的光学击穿阈值提高幅度近似, 都由 70 GW/cm<sup>2</sup> 提高到 140 GW/cm<sup>2</sup> 左右.

图6 是 FC-3283, GF-180 和 HFE-7100 三种介质在过滤之前和过滤之后 (孔径为 0.1 μm) 的 SBS 能量反射率随入射光能量变化的实验曲线, 其 SBS 参数如表 2 所列. 从图可看出, 过滤之前, 当入射光能量大于 100 mJ 时, 三种介质先后开始出现光学击穿现象, 随着入射光能量的增加, 能量反射率开始迅速下降, 且波动相对较大, 最高能量反射率仅为 40%—60%. 过滤之后, 当入射光能量大于 300 mJ 时, GF-180 和 HFE-7100 才开始出现光学击穿现象, 随着入射光能量的增加, 能量反射率开始缓慢下降, 且波动较小, 最高能量反射率达到了 70%—80%; 当入射光能量大于 450 mJ 时, FC-3283 才开始出现光学击穿现象.

表2 介质的 SBS 参数

介质	平均分子量	沸点/°C	运动黏度/cSt	增益系数/cm·GW <sup>-1</sup>	声子寿命/ns	频移/MHz
FC-3283	521	128	0.75	4.2	0.6	1079
GF-180	680	174	2.6	2.9	0.14	1193
HFE-7100	250	61	0.38	9.5	1.5	1186

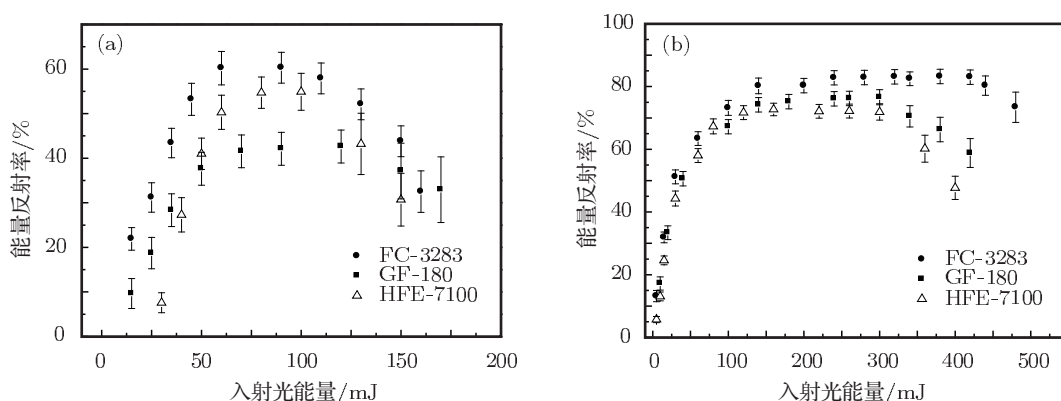


图6 不同介质的能量反射率随入射光能量变化的实验曲线 (a) 过滤之前; (b) 过滤之后

## 4 结论

本文从介质与杂质颗粒的热传导方程,建立了介质中热作用破坏的物理模型,数值模拟了杂质颗粒的温度随其半径的变化曲线,并得知介质的杂质颗粒存在一个最大热作用半径,当杂质颗粒尺寸在最大热作用半径附近时,介质最容易出现光学击穿现象,其光学击穿阈值最低.利用不同孔径的过滤

膜对 FC-3283, GF-180 和 HFE-7100 介质进行过滤,并研究了过滤前后的光学击穿阈值和能量反射率.结果表明,随着过滤孔径的变小,介质光学击穿阈值逐渐提高,且过滤之后介质的能量反射率有了明显的提高.另外,还介绍了一种利用 He-Ne 激光透射光光斑变化来判断是否发生光学击穿现象的方法,该方法具有方便、准确的特点,可有效地减小由于肉眼观测引起的误差.

- [1] Yoshida H, Hatae T, Fujita H, Nakatsuka M, Kitamura S 2009 *Opt. Express* **17** 13654
- [2] Shi J, Chen X, Ouyang M, Liu J, Liu D 2009 *Appl. Phys. B* **95** 657
- [3] 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
- [4] Guo Q, Lü Z W, Wang Y L 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 221107
- [5] Hasi W L J, Lü Z W, Lu H H, Fu M L, Gong S, Lin D Y, He W M, Gao W 2010 *Appl. Phys. B* **98** 397
- [6] Hasi W L J, Lü Z W, Fu M L, Lu H H, Gong S, Lin D Y, He W M 2009 *Laser Part. Beams* **27** 533
- [7] Komolov V L 1997 *Proc. SPIE* **3093** 66
- [8] 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, 张祎, 何伟明 2006 物理学报 **55** 5252]
- [9] Hasi W L J, Lü Z W, He W M, Li Q, Ba D X 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5654 (in Chinese) [哈斯乌力吉, 吕志伟, 何伟明, 李强, 巴德欣 2005 物理学报 **54** 5654]
- [10] Hasi W L J, Lü Z W, He W M, Wang S Y, Liu S N 2004 *Chin. Opt. Lett.* **2** 718
- [11] Mullen R A, Matossian J N 1990 *Opt. Lett.* **15** 601
- [12] Eichler H J, Menzel R, Sander R, Smandek B 1992 *Opt. Commun.* **89** 260
- [13] Krupka R, Giesen A 1996 *Proc. SPIE* **2870** 528
- [14] Hu P, Chen F L 2005 *High Power Laser and Particle Beams* **17** 961 (in Chinese) [胡鹏, 陈发良 2005 强激光与粒子束 **17** 961]
- [15] Yoshida H, Kmetik V, Fujita H, Nakatsuka M, Yamanaka T, Yoshida K 1997 *Appl. Opt.* **16** 3739
- [16] Hasi W L J, Lü Z W, Gong S, Liu S J, Li Q, He W M 2008 *Appl. Opt.* **47** 1010
- [17] 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]
- [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 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 034208 (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 2011 物理学报 **60** 034208]
- [19] Park H, Lim C, Yoshida H, Nakatsuka M 2006 *Jpn. J. Appl. Phys.* **45** 5073
- [20] Bravo I, Diaz-de-Mera Y, Aranda A, Smith K, Shinec K P, Marstond G 2010 *Phys. Chem. Chem. Phys.* **12** 5115

# Research on the influence of impurity particles on the optical breakdown threshold value of stimulated Brillouin scattering medium\*

Hasi Wu-Li-Ji<sup>†</sup> Wang Xue-Yang Guo Xiang-Yu Zhong Zhao-Ming Fan Rui-Qing  
Lin Dian-Yang He Wei-Ming Lü Zhi-Wei<sup>‡</sup>

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

(Received 8 November 2011; revised manuscript received 21 December 2011)

## Abstract

In this paper, we establish the physical model of hot damage to the stimulated Brillouin scattering (SBS) medium, and with numerical simulation method the curve of the temperature of impurity particles versus the radius is investigated. The result indicates that impurity particle has a maximal thermal effect radius and when the sizes of particles contained in the medium are near the radius, the optical breakdown phenomenon is most likely to appear, and at this point the optical breakdown threshold is lowest. We use FC-3283, GF-180 and HFE-7100 as the SBS medium in Continuum Nd: YAG laser system. The SBS medium passes through the filter with different diameters. We study the optical breakdown thresholds and energy reflectivities before and after filtration. It is demonstrated that with the filter diameter decreasing, the optical breakdown threshold increases gradually and the energy reflectivity is significantly improved through filter. In addition, a method of using He-Ne laser transmission light spot size to judge whether optical breakdown phenomenon happens, is also developed. This method is convenient and accurate, and can effectively reduce the error caused by naked eye observation.

**Keywords:** stimulated Brillouin scattering, SBS medium, impurity particles, optical breakdown threshold value

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

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61138005, 21071035), the Program for New Century Excellent Talents in University, China (Grant No. NCET-08-0173) and the Fundamental Research Funds for Central Universities, China (Grant No. HIT.BRET2.20100/2).

<sup>†</sup> E-mail: hasiwuliji@sohu.com

<sup>‡</sup> E-mail: zw.lu@sohu.com