

# 受激布里渊散射介质光学击穿的研究\*

哈斯乌力吉 吕志伟† 李 强 巴德欣 张 何伟明

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所 哈尔滨 150001)

(2005 年 12 月 19 日收到 2006 年 3 月 13 日收到修改稿)

研究了介质所含杂质悬浮颗粒的大小和介质本身化学结构特性对光学击穿阈值的影响. 实验结果表明, 随着介质所含杂质悬浮颗粒的变小, 其光学击穿阈值先是缓慢增大之后(颗粒直径小于  $0.22\mu\text{m}$ ) 迅速增大. 通过净化介质可提高光学击穿阈值, 进而提高相位共轭保真度、能量反射率及其稳定度等 SBS 特性. 分子中外层原子对内部化学键的保护作用越好, 外层原子的电离能越高, 价电子数目越少, 介质光学击穿阈值就越高.

关键词: 受激布里渊散射, 液体介质, 光学击穿

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, 因此多年来 SBS 相位共轭理论及其实验得到了广泛地研究<sup>[1]</sup>. 大量研究表明, 介质光学击穿对 SBS 特性有很大的影响, 例如光学击穿现象将会导致 SBS 能量反射率、相位共轭保真度、稳定度等性能的降低<sup>[2]</sup>, 因此提高现有介质的光学击穿阈值和寻找光学击穿阈值高的新介质是进一步提高 SBS 特性的重要环节. 本文用溶剂过滤器(孔径从  $0.022\mu\text{m}$  至  $1.2\mu\text{m}$  不等)对液体介质进行净化, 进而研究了介质所含杂质悬浮颗粒的大小对光学击穿阈值的影响以及光学击穿对 SBS 特性的影响; 选用化学结构近似的不同介质, 进而研究了介质化学结构对光学击穿阈值的影响.

## 2. 实验研究

实验装置如图 1 所示, Nd:YAG 调 Q 激光器有全反射镜 ( $M_1$ )、调 Q 染料片、偏振片 ( $P_1$ )、Nd:YAG 棒、小孔光阑 (hole) 和部分反射镜 ( $M_2$ ) 组成. 偏振片  $P_2$  和偏振片  $P_1$  平行,  $P_2$  和  $1/4$  波片组成隔离器, 防止 SBS 后向散射光进入 YAG 振荡器. 振荡器输出的

p 偏振光经  $1/4$  波片后变成圆偏振光, 入射到 SBS 系统. SBS 系统由聚焦透镜和产生池(池长为  $40\text{cm}$ ) 组成. 由相位共轭镜返回的 Stokes 光经过  $1/4$  波片后变为 s 偏振光, 被偏振片  $P_2$  反射输出. 输入光和 SBS 光的能量用能量计 ED200 探测, 并用数字示波器 TDS684A 来记录. 相位共轭保真度是通过列阵相机测量激光光束能量远场角分布而获得<sup>[3]</sup>, 光学击穿闪光用 CCD 拍摄.

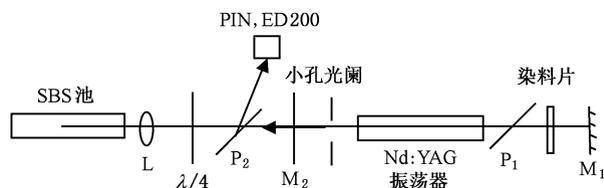


图 1 SBS 实验装置示意图

### 2.1. 介质所含杂质悬浮颗粒对光学击穿阈值的影响

介质所含杂质悬浮颗粒在强光照射下吸收较多的光能量, 使得杂质及其附近处形成较强的紫外辐射, 结果由光离化作用产生初始自由电子. 初始自由电子吸收激光能量, 并以很大的能量碰撞其他原子(离子), 放出更多的电子, 这样循环往复, 瞬间形成了电子雪崩过程<sup>[4]</sup>, 这就是介质光学击穿过程. 杂质悬浮颗粒内部热传导建立的平均本征时间  $\tau$  (约

\* 国家自然科学基金(批准号: 10476009, 60478020)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: zw\_lu@sohu.com

$10^{-8}$  s)由下面方程表示出<sup>[5]</sup>：

$$\tau = c\rho q^2/k,$$

式中  $c$  为比热,  $\rho$  为密度,  $q$  为杂质悬浮颗粒的半径,  $k$  为热传导率. 从方程可知,  $\tau \propto q^2$ , 即颗粒越大, 热弛豫时间就越长, 升温就越高, 越易产生光离化作用; 反之, 颗粒越小, 热弛豫时间就越短, 升温就越低, 越不易产生光离化作用. 文献 [5] 的理论模拟结果表明, 杂质悬浮颗粒的半径  $q > 0.1\mu\text{m}$  时, 易产生光离化作用, 而杂质悬浮颗粒的半径  $q < 0.1\mu\text{m}$  时, 不易产生光离化作用.

用溶剂过滤器(孔径分别为  $0.022, 0.1, 0.22, 0.45, 0.8, 1.2\mu\text{m}$ )分别对  $\text{CCl}_4$  和  $\text{H}_2\text{O}$  进行净化<sup>[6]</sup>,

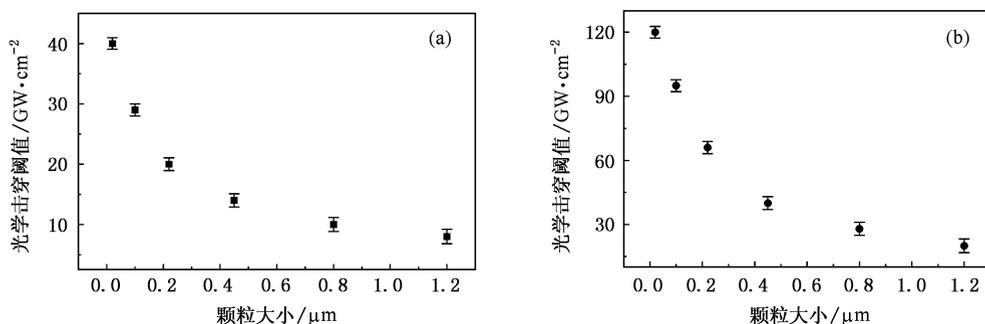


图 2 介质光学击穿阈值随其所含杂质悬浮颗粒大小的变化关系 (a)  $\text{CCl}_4$  (b)  $\text{H}_2\text{O}$

### 2.2. 光学击穿对 SBS 特性的影响

实验时 Nd:YAG 调 Q 激光器输出抽运光波长为  $1.064\mu\text{m}$ , 重复率为 1Hz, 脉宽约为 8.0ns, 最高能量约为 50.0mJ, 输入能量的变化是通过加入衰减片来实现, 发散角约为  $1.6\text{mrad}$ . 除了输入光能量以外, 透镜焦距对介质光学击穿现象的影响也比较大, 为了详细显示光学击穿现象对 SBS 性能的影响, 选用焦距为 75mm 的透镜. 从图 2 可看出, 当滤膜孔径大于  $0.45\mu\text{m}$  时,  $\text{CCl}_4$  光学击穿阈值无明显的提高; 然而当滤膜孔径小于  $0.22\mu\text{m}$  时,  $\text{CCl}_4$  光学击穿阈值有明显的提高. 为便于比较, 实验当中分别选取未净化的  $\text{CCl}_4$ , 用孔径为  $0.22\mu\text{m}$  滤膜净化的  $\text{CCl}_4$  和用孔径为  $0.02\mu\text{m}$  滤膜净化的  $\text{CCl}_4$  作为散射介质, 详细研究了光学击穿对 SBS 特性的研究.

图 3 是  $\text{CCl}_4$  净化前后的能量反射率随输入能量的变化关系. (1) 对于未净化的  $\text{CCl}_4$ , 始终发生光学击穿现象. 当输入能量小于 20mJ 时, 光学击穿现象较弱(声音小, 光斑弱, 如图 4(a)所示), 对能量反射率的影响较小, 因此随着输入能量的提高, 能量反

并测定了其光学击穿阈值(定义为介质内可见闪光或火花出现的概率为 50% 时的输入光功率密度). 图 2 是两种介质光学击穿阈值随其所含杂质悬浮颗粒大小的变化关系, 从图中可看出, 虽然两种介质的光学击穿阈值不同, 但是两种介质的光学击穿阈值随其所含杂质悬浮颗粒大小的变化趋势是一致的. 当介质所含杂质悬浮颗粒大于  $0.22\mu\text{m}$  时, 随着介质所含杂质悬浮颗粒的变小, 其光学击穿阈值缓慢增大; 当介质所含杂质悬浮颗粒小于  $0.22\mu\text{m}$  时, 随着介质所含杂质悬浮颗粒的变小, 其光学击穿阈值迅速增大. 这样实验结果与文献 [5] 理论模拟结果的趋势基本一致.

射率增加(随着输入能量的提高, 焦点附近的输入光功率密度逐渐变大, SBS 能量转换效率增加). 但是, 当输入能量大于 20mJ 时, 光学击穿现象变强(声音变大, 光斑变强, 如图 4(b)所示), 对能量反射率的影响变大, 因此随着输入能量的提高, 能量反射率反而开始下降, 最终趋于零<sup>[7]</sup>. (2) 对于用孔径为  $0.22\mu\text{m}$  滤膜净化的  $\text{CCl}_4$ , 当输入能量小于 35mJ 时, 不出现光学击穿现象, 最高能量反射率由 35% 提高到 55%, 稳定性(定义为测量值均方差与算术平均值之比)<sup>[8]</sup>由 5% 提高到 3%, 相位共轭保真度由低

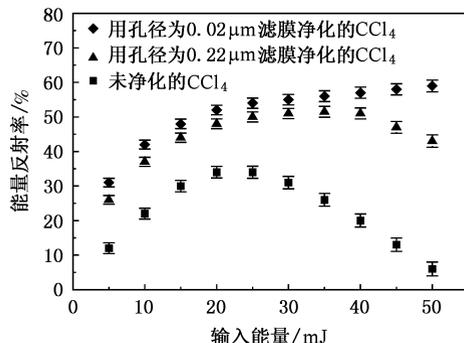


图 3  $\text{CCl}_4$  净化前后的能量反射率随输入能量的变化关系

于 80% 提高到高于 90%。但是,当输入能量大于 40mJ 时,也开始出现光学击穿现象,能量反射率开始下降。(3)对于用孔径为  $0.02\mu\text{m}$  滤膜净化的  $\text{CCl}_4$ ,始终不出现光学击穿现象。当输入能量小于 35mJ 时,其能量反射率、稳定性和相位共轭保真度与用孔

径为  $0.22\mu\text{m}$  滤膜净化的  $\text{CCl}_4$  近似。但是,当输入能量大于 35mJ 时,仍然不出现光学击穿现象,因此能量反射率、稳定性和相位共轭保真度不出现降低。图中能量反射率最终上升缓慢是由于能量提取效率趋于饱和的缘故<sup>[9]</sup>。



图 4 未净化  $\text{CCl}_4$  光学击穿时的闪光

### 2.3. 介质化学结构特性对光学击穿阈值的影响

介质光学击穿阈值除与所含杂质悬浮颗粒的大小有关,还与介质本身化学结构特性有关。介质分子中外层原子对内部化学键的保护程度、外层原子电离能的大小和价电子数目是影响介质光学击穿的主要因素。本文选用两组介质研究了以上参数对其光学击穿阈值的影响,第 1 组介质为 FC-72( $\text{C}_6\text{F}_{14}$ ), FC-75( $\text{C}_8\text{F}_{18}$ )和  $\text{C}_6\text{F}_6$ ,第 2 组介质为  $\text{CCl}_4$ ,  $\text{C}_2\text{Cl}_4$  和  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ 。对以上介质均用孔径为  $0.22\mu\text{m}$  的溶剂过滤器进行净化,之后测定了其光学击穿阈值,列于表 1 中。

表 1 介质的光学击穿阈值

第 1 组	介质	$\text{C}_6\text{F}_{14}$	$\text{C}_8\text{F}_{18}$	$\text{C}_6\text{F}_6$
		光学击穿阈值/ $\text{GW}\cdot\text{cm}^{-2}$	100	105
第 2 组	介质	$\text{CCl}_4$	$\text{C}_2\text{Cl}_4$	$\text{CH}_2\text{Cl}_2$
		光学击穿阈值/ $\text{GW}\cdot\text{cm}^{-2}$	20	18

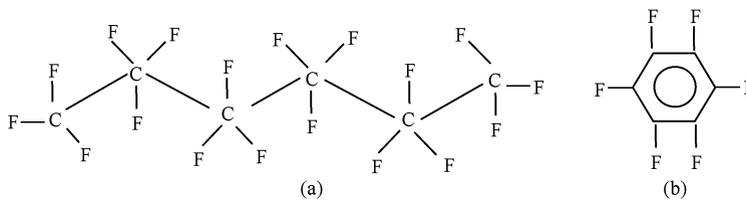


图 5 FC-72 和  $\text{C}_6\text{F}_6$  分子空间构型 (a)FC-72 (b) $\text{C}_6\text{F}_6$

第 2 组三种介质中  $\text{CCl}_4$  和  $\text{C}_2\text{Cl}_4$  的光学击穿阈值比较低,而且大小也接近,但是  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  的光学击穿阈值比较高。以上三种介质的空间结构相同,均是在空间分布成四面体,碳原子位于四面体的中心,氟原子、氢原子或原子团在四面体的顶点(可认为  $\text{CCl}_4$  分子是  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  分子中的两个氢原子被两个氯原子取代而得),外部的氯原子或氢原子包围着内部的碳原子或碳骨架,因此氯原子和氢原子结构的不同导

致了其光学击穿阈值的差异。 $\text{CCl}_4$  的雪崩电离机理一般可认为如下<sup>[11]</sup>:介质所含杂质悬浮颗粒吸收光后产生初始自由电子,初始自由电子与  $\text{CCl}_4$  分子结合形成  $\text{CCl}_4^-$  分子离子, $\text{CCl}_4^-$  分子离子电离成  $\text{Cl}^-$  离子和  $\text{CCl}_3\cdot$  自由基, $\text{Cl}^-$  离子在强激光的作用下很容易电离,从而积累大量的自由电子,并引发雪崩电离现象。从  $\text{CCl}_4$  的雪崩电离过程可知,雪崩电离过程与电离能、价电子数目、键能和电子亲和能等参数

均有关<sup>[12]</sup>, 但大量自由电子的产生主要是由外层  $\text{Cl}^-$  离子的电离引起的, 因此氯原子和氢原子电离能和价电子数目的不同是引起其光学击穿阈值有差异的主要原因<sup>[13]</sup>. 表 2 列出了氯原子和氢原子的各级电离能<sup>[14]</sup>, 从表中可知, 不仅氯原子的一级电离能比氢原子小, 而且价电子数目也多, 因此  $\text{CCl}_4$  和  $\text{C}_2\text{Cl}_4$  的光学击穿阈值比  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  小.

表 2 元素的电离能

元素	电子组态	电离能/eV						
		I	II	III	IV	V	VI	VII
H	$1s^1$	13.59						
Cl	$3s^2 3p^5$	12.96	23.81	39.61	53.46	67.80	97.03	114.19

### 3. 结 论

实验结果表明, 当介质所含杂质悬浮颗粒大于  $0.22\mu\text{m}$  时, 随着介质所含杂质悬浮颗粒的变小, 其光学击穿阈值缓慢增大; 当介质所含杂质悬浮颗粒小于  $0.22\mu\text{m}$  时, 随着介质所含杂质悬浮颗粒的变小, 其光学击穿阈值迅速增大. 通过净化介质, 可提高光学击穿阈值, 进而提高其相位共轭保真度, 能量反射率及其稳定度等 SBS 特性. 分子中外层原子对内部化学键的保护作用越好, 外层原子的电离能越高, 价电子数目越少, 介质光学击穿阈值就越高.

- [1] Lü Z W, Lü Y L, Yang J 2003 *Chin. Phys.* **12** 507
- [2] Ruth A M, Jesse N M 1990 *Opt. Lett.* **15** 601
- [3] Yang J, He W M, Lü Y L, Lü Z W 2003 *Chin. J. of Lasers* **30** 512 (in Chinese) [杨, 何伟明、吕月兰、吕志伟 2003 中国激光 **30** 512]
- [4] Ni X W, Lu J, He A Z 1994 *Acta Phys. Sin.* **43** 1795 [倪晓武、陆建、贺安之 1994 物理学报 **43** 1795]
- [5] Chen F, Meng S X 1998 *Progress in Physics* **18** 187 (in Chinese) [陈飞、孟绍贤 1998 物理学进展 **18** 187]
- [6] Hasi W L J, Lü Z W, He W M, Wang S Y, Liu S N 2004 *Chin. Opt. Lett.* **2** 718
- [7] Hasi W L J, Lü Z W, He W M, Li Q, Ba D X 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5654 [哈斯乌力吉、吕志伟、何伟明、李强、巴德欣 2005 物理学报 **54** 5654]
- [8] Lü Z W, Wang X H, Lin D Y, Wang C, Zhao X Y 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1184 (in Chinese) [吕志伟、王晓慧、林殿阳、王超、赵晓彦 2003 物理学报 **52** 1184]
- [9] Ding Y C, Lü Z W, He W M 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2767 (in Chinese) [丁迎春、吕志伟、何伟明 2002 物理学报 **51** 2767]
- [10] 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]
- [11] Andreev N F, Efim K, German A P 1992 *IEEE J. Q. E.* **28** 330
- [12] Yoshida H, Kmetik V, Fujita H, Nakatsuka M, Yamanaka T, Yoshida K 1997 *Appl. Opt.* **36** 3739
- [13] Wang X H, Lü Z W, Lin D Y, Wang C, Zhao X Y 2004 *Chin. Phys.* **13** 1733
- [14] Dean J A 1991 *Lange's Handbook of Chemistry* (13th Ed) (New York: McGraw-Hill Book Company) p3 A

# Research on optical breakdown of SBS media<sup>\*</sup>

Hasi Wu-Li-Ji Lü Zhi-Wei<sup>†</sup> Li Qiang Ba De-Xin Zhang Yi He Wei-Ming

( *Institute of Opto-electronics , Harbin Institute of Technology , Harbin 150001 , China* )

( Received 19 December 2005 ; revised manuscript received 13 March 2006 )

## Abstract

The influences of the size of suspended particles in the medium and chemical structural characteristics of the medium on the threshold of the optical breakdown are researched experimentally. The experimental results show that the optical breakdown threshold first rises slowly in accord with the size of suspended particles in the medium , while later it rises sharply ( when the diameters of the particles are less than  $0.22\mu\text{m}$  ). By purifying the medium , the optical breakdown threshold can be increased ; thus the phase-conjugation fidelity , the reflectivity of the energy and the stability of SBS increase correspondingly. Generally speaking , better protection to the inner chemical bond offered by the outer atoms , and less valence electron together with higher ionization energies of the outer atoms will lead to higher optical breakdown threshold of the media .

**Keywords** : stimulated Brillouin scattering , liquid medium , optical breakdown

**PACC** : 4265C , 4265F

---

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

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : zw\_lu@sohu.com