

# 水中受激布里渊散射微弱 Stokes 信号光的高增益放大<sup>\*</sup>

高 玮<sup>1)†</sup> 吕志伟<sup>1)†</sup> 何伟明<sup>1)</sup> 董永康<sup>1)</sup>

1) 哈尔滨工业大学光电子技术研究所 哈尔滨 150001)

2) 哈尔滨理工大学应用物理系 哈尔滨 150080)

(2007 年 6 月 20 日收到, 2007 年 9 月 27 日收到修改稿)

采用脉冲宽度为 7.2 ns 的种子光注入式倍频 Nd:YAG 脉冲激光器, 以  $CS_2$  为放大介质, 实验并理论研究了水中受激布里渊散射微弱 Stokes 光的信号增益随延迟时间、放大器池长、抽运光能量的变化规律. 结果表明, 当抽运光脉冲相对信号光脉冲延迟进入放大器, 且延迟时间为脉冲宽度的一半, 抽运光能量略低于介质受激布里渊散射阈值, 选择合适的放大器池长可获得最佳的信号增益. 适当选择抽运光能量, 亦可实现微弱信号光的线性放大. 实验中采用独立双池放大系统, 当水中 Stokes 信号光的能量为 1  $\mu$ J 时, 信号增益达  $7 \times 10^7$ .

关键词: 布里渊放大器, 信号增益, 延迟时间, 抽运光能量

PACC: 4265C, 4225F

## 1. 引 言

布里渊激光雷达可用于探测海水中的声速、温度及水下目标<sup>[1-4]</sup>, 其发展潜力巨大. 近年来, 基于受激布里渊散射(SBS)的雷达探测系统已成为研究的热点<sup>[5,6]</sup>, 与以往的自发布里渊雷达系统相比, 这种探测系统能够提高信噪比和深度分辨率<sup>[5]</sup>, 而且 SBS 具有相位共轭的特性, 使装置更加简单、实用<sup>[6]</sup>. 实验发现, 当近距离探测时, 接收信号的信噪比较高, 随着探测距离的增加, 接收到的 Stokes 信号光逐渐变弱, 信噪比下降; 当探测距离为 22 m 时, Stokes 信号光已淹没在噪声中, 无法被探测到<sup>[5]</sup>. 为了解决该问题, 进一步提高系统的信噪比, 增加探测距离, 文献[7]提出利用布里渊放大技术以  $CS_2$  为放大器介质选择性地放大水的 Stokes 信号光的设计思想, 并采用紧凑双池结构, 实现了当信号光能量为 5  $\mu$ J 时信号增益达  $10^2$ . 然而, 这样的实验条件及结果并不能满足实际探测的需要, 应进一步优化布里渊放大系统的设计, 提高信号增益.

本文采用独立双池布里渊放大系统, 实验研究了信号增益随延迟时间、放大器池长、抽运光能量等参数的变化规律以及微弱信号光线性放大的条件, 并利用频率失谐布里渊放大理论模型进行了数学模拟与理论分析, 实验结果与理论模拟的变化趋势基本符合. 研究表明, 合理选择实验参数可实现对皮焦量级信号光的放大, 信号增益可达  $10^7$  以上.

## 2. 实 验

### 2.1. 实验装置

实验装置如图 1 所示. 激光光源采用 Continuum Powerlite Precision II 9010 型种子注入式脉冲 Nd:YAG 激光器, 线宽为 90 MHz, 经倍频后输出波长为 532 nm, 脉冲宽度为 7.2 ns, 重复率为 10 Hz. 来自激光器的 s 偏振光经由 1/2 波片入射到偏振片  $P_1$ , 调整 1/2 波片使激光偏振方向旋转适当角度, 使其具有 s 分量和 p 分量波, 其中 s 波由偏振片  $P_1$  和  $P_2$

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号:10476009, 60478020), 哈尔滨工业大学优秀团队支持计划和黑龙江省教育厅科学技术研究计划(批准号:11521048)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: zw\_lu@sohu.com

反射,经 1/4 波片变成圆偏振光,再经透镜  $L(f = 15\text{ cm})$  聚焦到装有水的 SBS 产生器中,后向反射的 Stokes 光经过 1/4 波片后变为 p 偏振光,透过偏振片  $P_2$  后再由 1/4 波片变为圆偏振光,经标定好的中性密度滤光片(ND)衰减后作为放大器的输入 Stokes 信号光,其光强用  $I_s$  表示.由偏振片  $P_1$  透射的 p 波经全反镜  $M_1, M_2$  反射后,透过偏振片  $P_3$  经 1/4 波片变成圆偏振光,此光作为放大器的抽运光,其光强用  $I_p$  表示.两束光在装有  $\text{CS}_2$  的放大器中相互作用,放大的 Stokes 出射光由偏振片  $P_3$  耦合输出.抽运光、Stokes 信号光及其出射光的能量用 OPHIR

能量计 ED 探测,低于  $60\ \mu\text{J}$  的能量用 Newport818J-09 型能量计探测.实验中抽运光能量没有超过介质 SBS 阈值,用直径为 6 mm 的小孔 A 放在距离放大器 190 cm 的位置上截取放大信号,阻挡其他噪声光的影响.当无 Stokes 信号光时,各光学元件反射光及介质自发散射等噪声非常微弱,818J-09 型能量计无法探测到该信号,故在测量时没有考虑噪声的影响.实验中信号增益的定义<sup>[8]</sup>为

$$\beta = E_{\text{Sout}}/E_{\text{Sin}},$$

其中  $E_{\text{Sin}}$  和  $E_{\text{Sout}}$  分别为 Stokes 信号光(简称信号光)和 Stokes 出射光的能量.

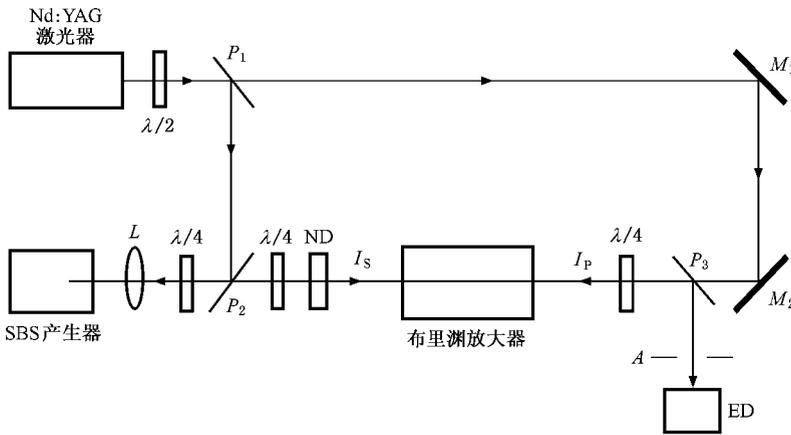


图 1 实验装置示意图

### 2.2. 实验结果

图 2 是不同延迟时间条件下,实验得到信号增益随信号光能量变化的关系.实验中抽运光的能量为 50 mJ,光束直径约为 0.9 cm,放大器池长为 20 cm.改变抽运光和信号光到达放大器两端的光程,从而改变它们进入放大器的时间顺序.定义延迟时间  $t_0$  为抽运光脉冲滞后信号光脉冲的时间<sup>[9]</sup>, $t_0 < 0$  表示抽运光超前信号光.分别测量了延迟时间为 5.3, 3.5, 0 和 -4.7 ns 四种情况下,信号增益随信号光能量的变化.从图 2 可以看出,抽运光相对于信号光延迟进入放大器,即信号光超前 3.5 ns 时,信号增益最高,且所能放大的信号光能量最低,对于皮焦量级的信号光,其增益高达  $10^7$ .如果抽运光延迟超过脉冲宽度的一半,达 5.3 ns 时,信号增益也会下降.若两束光同时进入放大器,对于  $10^{-4}$  mJ 量级以上的信号,其放大情况和信号光超前 3.5 ns 时的情况基本相当,而对于皮焦量级的信号光,其放大的

Stokes 出射光非常微弱,利用现有设备无法探测其能量的大小.当信号光延迟 4.7 ns,即抽运光超前进入放大器时,从图 2 中明显看出其信号增益下降,且对皮焦量级的信号光无法放大.

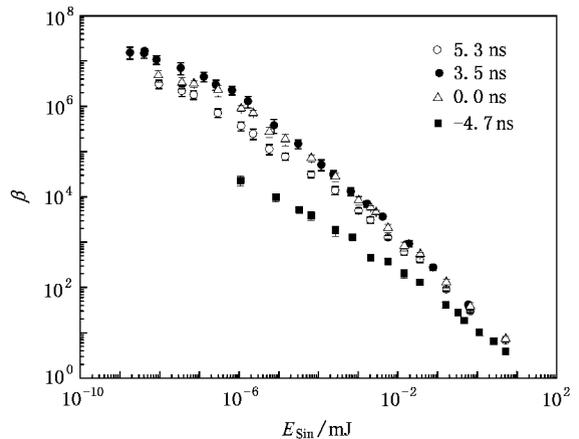


图 2 当延迟时间为 5.3, 3.5, 0 和 -4.7 ns 时信号增益随信号光能量的变化

图 3 为放大器池长分别为 10, 20, 40 和 60 cm 时, 在相同抽运光能量条件下的信号增益与信号光能量的关系. 由图 3 可见, 增加放大器的长度, 虽然增加了抽运光和信号光的作用长度, 但对于池长为 20, 40 和 60 cm 的情况, 信号增益变化不大, 且能够放大的最低信号光的增益都在  $10^7$  附近. 另外, 实验中发现当池长超过 40 cm 时, 皮焦量级的信号光已无法放大. 当池长为 10 cm 时, 由于作用长度的减小, 信号增益有所下降.

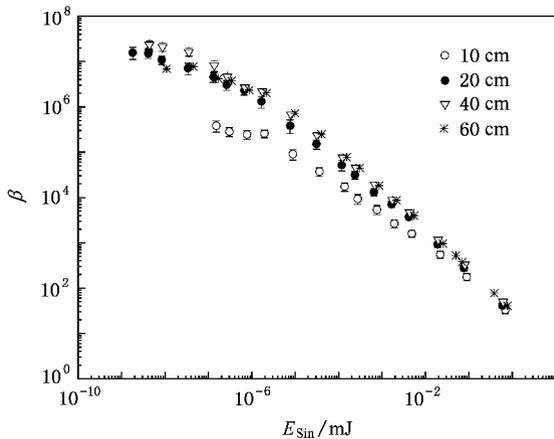


图 3 放大器池长为 10, 20, 40 和 60 cm 时信号增益随信号光能量的变化

最后还研究了抽运光能量对信号增益的影响. 图 4 为不同抽运光能量条件下, 信号增益随信号光能量的变化. 由图 4 可见, 当抽运光能量分别为 16, 20 和 30 mJ 时, 信号光能量低于  $10^{-5}$  mJ 区域, 信号增益出现饱和趋势, 即随着信号光能量的减少, 其增益变化很小. 这说明 Stokes 出射光能量与信号光能

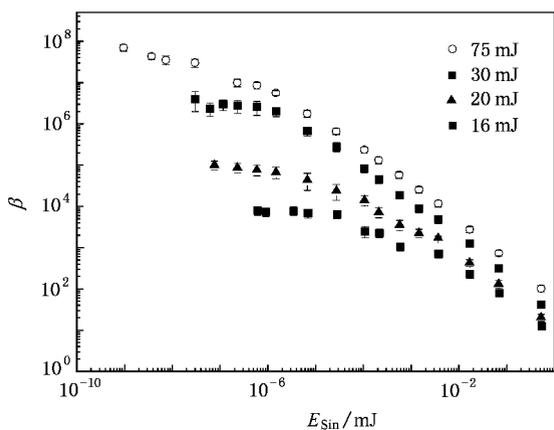


图 4 抽运光能量为 75, 30, 20 和 16 mJ 时信号增益随信号光能量的变化

量有关, 并随其线性变化. 当抽运光能量为 75 mJ 时, 线性放大区域不明显. 从图 4 还可以看出, 随着抽运光能量的增加, 信号增益整体提高, 最高可接近  $10^8$ . 实验发现, 当抽运光能量超过介质的 SBS 阈值一定程度时, 来自介质自身 SBS 的竞争将使信号增益下降, 而且使微弱的皮焦量级信号光无法放大.

### 3. 理论模拟与分析

利用文献 [7] 中的频率失谐瞬态布里渊放大理论模型, 数值模拟了信号增益随延迟时间和放大器池长的变化规律以及在不同抽运光强度下信号增益随信号光强度的变化关系.

图 5 为不同抽运光脉冲宽度条件下归一化信号增益  $\alpha$  随延迟时间  $t_0$  的变化曲线, 计算参数如下: 抽运光强度为  $30 \text{ MW/cm}^2$ , 信号光强度为  $1 \text{ W/cm}^2$ , 两束光为脉冲宽度相同的高斯型脉冲, 激光波长为 532 nm,  $\text{CS}_2$  介质的增益系数为  $68 \text{ cm/GW}$ , 声子寿命为 1.6 ns, 布里渊频移为 7.58 GHz, 池长为 20 cm, 纯水的布里渊频移为 7.52 GHz; 模拟时不考虑各光波的线宽. 从图 5 可以看出, 当脉冲宽度分别为 5 和 10 ns 时, 相应的延迟时间分别在 2.5 和 5 ns 附近所获得的信号增益最佳, 即当延迟时间约为脉冲宽度的一半时放大效果最好. 因为这时信号光的脉冲峰值部分与抽运光的脉冲前沿中上部在池中相遇, 两者相互作用最充分, 在放大过程中能够更加有效地利用抽运光能量. 因此, 当实验中采用的激光脉冲宽度为 7.2 ns, 抽运光延迟 3.5 ns, 约为脉冲宽度的一半时, 信号增益最高. 当抽运光延迟 5.3 ns 时, 信号光的脉冲后沿与抽运光脉冲在池中相遇, 相互作用减弱, 致使信号增益下降. 若信号光延迟进入放

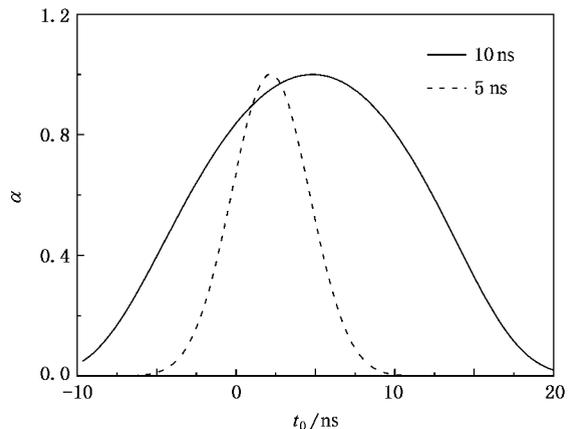


图 5 归一化信号增益随延迟时间的变化

大器,显然会造成抽运光能量的损失,信号增益下降,甚至对微弱信号光无法放大.

图 6 为信号增益随放大器池长  $L$  的变化规律,计算参数和实验条件接近.从图 6 可以看出,随着池长的增加,开始阶段信号增益增加迅速,当池长超过 40 cm 后信号增益基本不再增加,实际测量发现还会有所下降,甚至对皮焦量级的信号光无法放大.这一方面是由于介质自身 SBS 的竞争,另一方面是因为池长的增长导致介质对光波的吸收增加,通常介质的吸收系数随着激光波长的变短而增大,所以对于短波长激光,放大器池长不宜过长.根据放大器池长来选择合适的抽运光强度,使其接近介质 SBS 阈值,若抽运光强度过高,来自介质自身 SBS 的竞争将使信号增益下降,而且使微弱的皮焦量级信号无法放大.

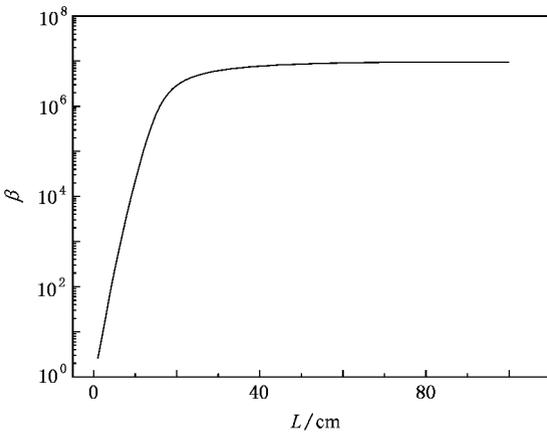


图 6 信号增益随放大器池长的变化

对于四种不同的抽运光强度值,信号增益随信号光强度变化的规律如图 7 所示.由图 7 可见,当抽运光强度较低时,在低信号光强度区增益出现饱和和效应,这意味着在此区域内 Stokes 出射光强度随着信号光强度呈线性变化,且抽运光强度越低,线性变化范围越大.在高信号光强度区,其增益随着信号光强度的减少而增加.当抽运光强度较高时,线

性放大区逐渐变小,甚至消失.实验测量的趋势(图 4)和理论模拟的结果基本相符.因此,适当选择抽运光强度可实现微弱信号光的线性放大,这一点对于光学图像的放大成像具有重要应用价值.

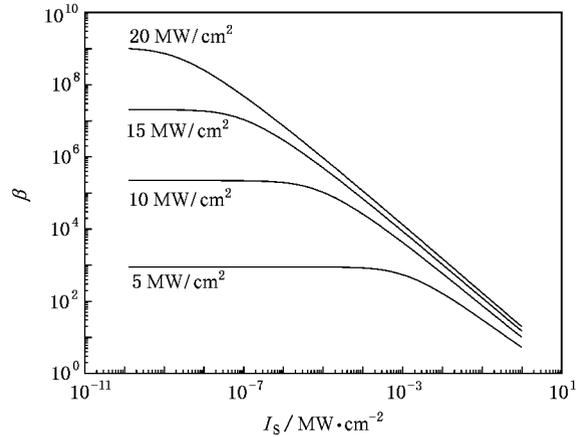


图 7 抽运光强度分别为 5, 10, 15 和 20 MW/cm<sup>2</sup> 时信号增益随信号光强度的变化

## 4. 结 论

采用独立双池布里渊放大系统,以 CS<sub>2</sub> 为放大器介质,对水中能量为 1 pJ 的 Stokes 信号光进行了高增益放大,信号增益最高达  $7 \times 10^7$ .从实验和理论上研究了信号增益随延迟时间、放大器池长、抽运光能量等参数的变化关系以及微弱信号光线性放大的条件.研究表明:为实现微弱信号光的高增益布里渊放大,抽运光脉冲应相对信号光脉冲延迟进入放大器,且延迟时间约为脉冲宽度的一半.在激光波长为 532 nm,脉冲宽度为 7.2 ns 条件下,放大器的池长应不超过 40 cm,在略低于介质 SBS 阈值的前提下,应适当提高抽运光强度,以弥补作用长度的不足.选择合适的抽运光能量,当信号光能量在  $10^{-10}—10^{-5}$  mJ 之间时,可实现微弱信号光的线性放大,信号增益达  $10^3—10^6$ .

[ 1 ] Dai R, Gong W, Xu J, Ren X, Liu D 2004 *Appl. Phys. B* **79** 235

[ 2 ] Gong W, Dai R, Sun Z, Ren X, Shi J, Li G, Liu D 2004 *Appl. Phys. B* **79** 635

[ 3 ] Popescu A, Schorstein T 2004 *Appl. Phys. B* **79** 955

[ 4 ] Popescu A, Walther T 2005 *Phys. Rev. E* **71** 056601

[ 5 ] Shi J, Li G, Gong W, Bai J, Huang Y, Liu Y, Li S, Liu D 2007 *Appl. Phys. B* **86** 177

[ 6 ] Lü Y L 2006 *Chin. J. Lasers* **33** (Suppl.) 339 (in Chinese) [ 吕月兰 2006 中国激光 **33** (增刊) 339 ]

[ 7 ] Gao W, Lü Z W, He W M, Zhu C Y, Dong Y K 2007 *Acta Phys. Sin.* **34** 124201

- Sin.* **56** 2693 ( in Chinese ) [ 高 玮、吕志伟、何伟明、朱成禹、董永康 2007 物理学报 **56** 2693 ]
- [ 8 ] Hasi W L J , Lü Z W , He W M , Wang S Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 742 ( in Chinese ) [ 哈斯乌力吉、吕志伟、何伟明、王双义 2005 物理学报 **54** 742 ]
- [ 9 ] Lü Y L , Dong Y K , Lü Z W 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5247 ( in Chinese ) [ 吕月兰、董永康、吕志伟 2006 物理学报 **55** 5247 ]

## High-gain amplification of weak Stokes signal of stimulated Brillouin scattering in water<sup>\*</sup>

Gao Wei<sup>1,2)</sup> Lü Zhi-Wei<sup>1)†</sup> He Wei-Ming<sup>1)</sup> Dong Yong-Kang<sup>1)</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Optoelectronics , Harbin Institute of Technology , Harbin 150001 , China )*

<sup>2</sup> *Department of Applied Physics , Harbin University of Science and Technology , Harbin 150080 , China )*

( Received 20 June 2007 ; revised manuscript received 27 September 2007 )

### Abstract

The influences of the delay time , the cell length and the pump energy on the gain amplification of weak Stokes signal of stimulated Brillouin scattering ( SBS ) in water are investigated theoretically and experimentally . In the experiment a frequency-doubled seed injection Nd :YAG laser with a pulse duration of 7.2 ns was used . Results showed that the pump pulse should lag the Stokes signal pulse by an amount equal to pulse half-width to obtain the maximum gain . Depending on the pump energy the signal below  $10^{-5}$  mJ is linearly amplified . By using CS<sub>2</sub> as amplifier medium , a Stokes signal of 1 pJ from water is amplified with high gain (  $7 \times 10^7$  ) in the regime below the pump 's self-SBS threshold .

**Keywords :** Brillouin amplifier , signal gain , delay time , pump energy

**PACC :** 4265C , 4225F

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 10476009 , 60478020 ) , the Program of Excellent Team in Harbin Institute of Technology , China and the Program of Science and Technology of the Education Bureau of Heilongjiang Province , China ( Grant No. 11521048 ) .

<sup>†</sup> E-mail : zw\_lu@sohu.com