

文章编号: 1001-3806(2002)04-0314-04

布里渊放大研究的进展*

丁迎春 吕志伟 何伟明

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨, 150001)

摘要: 介绍了受激布里渊散射相位共轭光放大的研究现状和存在的问题, 并指出其未来发展前景。

关键词: 受激布里渊散射; 相位共轭; 布里渊放大

中图分类号: TN722.1 **文献标识码:** A

Current situation for beam amplification of stimulated Brillouin scattering

Ding Yingchun, Lü Zhiwei, He Weiming

(Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001)

Abstract: In this paper, we introduce present research situation and question of beam amplification of stimulated Brillouin scattering and point out its development prospect.

Key words: stimulated Brillouin scattering; phase conjugation; Brillouin amplification

引言

受激布里渊散射相位共轭光放大(简称布里渊放大)是指在布里渊放大器中, 泵浦光束从布里渊介质池的一端入射, 具有小光学频移的种子光从布里渊介质池的另一端入射, 两束光在没有达到阈值的条件下相互干涉, 由电致伸缩力产生空间调制光栅, 如果两束光具有适当的频率失调, 即种子光的频移等于布里渊频移, 两束光的相互作用和滞后于干涉模式的移动光栅将导致能量从泵浦光到种子光的单向转移。布里渊放大器与传统的放大器相比, 具有窄的增益带宽、增益只在一个方向上、只在泵浦脉冲持续时间内存在增益等优点。布里渊放大器是产生高质量相位共轭光和放大弱信号的一种有效方案, 因为它能够承受高能量负载, 所以, 可以用布里渊放大器进行长脉冲压缩和实现多脉冲合成。

1 布里渊放大的研究现状

受激布里渊散射相位共轭镜有多种结构。由于振放双池能承受较高的激光功率, 所以, 振放双池 SBS 系统是实际应用的结构, 近年来, 受到人们的

关注。振放双池有两种结构, 一种是入射光束直接通过放大池后聚焦到相对短的振荡池, 在放大池中入射光强低于 SBS 阈值光强, 由振荡池反射的 Stokes 光经放大池放大后出射。这种结构的 SBS 相位共轭镜对入射能量的变化不是很敏感, 但是对于高的入射能量在振荡池前需要加入衰减片以限制到达聚焦振荡池的能量, 在入射能量非常高时, 为了使聚焦振荡池的能量低于自聚焦及光学损伤的阈值, 需要对入射能量进行大量的衰减, 这样, 从振荡池出射的 SBS 返回光又经衰减后不能饱和入射泵浦光, 减少了能量效率。另一种是入射泵浦光被分成两部分, 一部分光直接进入放大池, 另一部分光进入到 SBS 产生池产生 Stokes 频移种子光, 从布里渊放大池的另一侧入射, 两束光在放大池中相互作用后, Stokes 种子光提取泵浦光的能量后出射。由于这种振放双池中的布里渊放大池是实现脉宽压缩和多脉冲合成的有效方案, 所以, 研究这种结构的 SBS 相位共轭镜的放大问题是非常必要的。到目前为止, 人们对 SBS 放大的问题已经进行了一些研究。比较有代表性的研究如下。

在文献[1]中, 研究了具有高斯线型的泵浦光和信号光的布里渊放大过程, 实验装置如图 1 所示。Nd:YAG 调 Q 脉冲激光振荡器输出的脉宽为 30ns、能量为 30mJ 的单模激光脉冲通过法拉第旋转器和两个闪光灯泵浦的 Nd:YAG 放大器后能量可达 150mJ, 3mm 的光阑被放在两个放大器之间以

* 国家高技术惯性约束聚变主题和国家自然科学基金以及国防科技重点实验室基金资助项目。

作者简介: 丁迎春, 女, 1966 年 1 月出生。副教授, 博士研究生。现从事非线性光学方面的研究。

收稿日期: 2001-06-22; 收到修改稿日期: 2001-08-20

改善被放大光束的空间光束质量,脉冲的 20% 被分束后聚焦到包含 $\text{CCl}_2\text{FCClF}_2$ 的 SBS 池,产生 Stokes 频移信号光束,信号光通过偏振片和菲涅耳棱体变成圆偏振光入射到放大池。剩余的 80% 光束作为泵浦光入射到布里渊放大池,泵浦光束通过一个偏振片和菲涅耳棱体变成圆偏振光。放大池长 25cm,也装有 $\text{CCl}_2\text{FCClF}_2$,放大池窗片与轴线方向成 30° 角,可以阻止放大池两窗片之间的寄生振荡和光学反馈。透射的泵浦光束通过另一个菲涅耳棱体后变成线偏振光,通过偏振片后被抛弃。被放大信号光通过菲涅耳棱体后变成线偏振光被偏振片反射。研究发现在小信号区域,信号光通过放大器后,由于信号光束增益对泵浦光强的指数依赖关系,信号光束空间分布变窄。光斑大小的相对变化与信号光峰值强度增益和信号光与泵浦光光斑的比有关。在大信号泵浦抽空区域,如果泵浦抽空很严重,信号光束空间分布变宽,输出光斑大小与入射信号光强度有关。

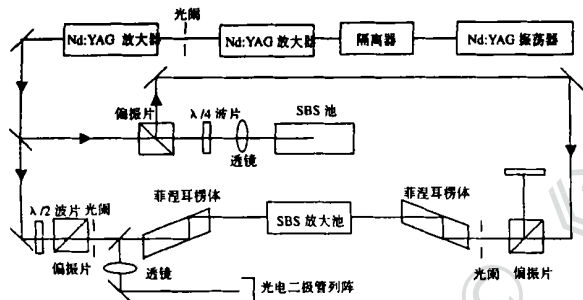


图 1 文献[1]和[2]中测量布里渊放大保真度等的实验装置

在文献[2]中,使用与文献[1]中类似的实验装置,不同的是 SBS 产生池和放大池中的介质为 TiCl_4 ,从放大池出射的放大信号光通过菲涅耳棱体后变成线偏振光被偏振片反射后,又进入到一个装有丙酮的 SBS 产生池,由产生池产生的相位共轭光沿信号光路传播,被放在信号光路中的 99.7% 的分束片反射,由探测器接收。也就是说在该实验中把信号光在布里渊放大池中的放大光作为产生相位共轭光的泵浦光。实验研究了在 Stokes 频移自发散射噪声的存在对弱信号放大的限制。测量了放大噪声强度随泵浦强度的变化规律。放大噪声对泵浦光强的线性依赖关系证实正工作在小信号区域,曲线的陡度给出了布里渊增益系数为 $g = 0.013\text{cm}/\text{MW}$,在测量增益时必须保证泵浦光束必须有光滑的空间线型,因为光束的任何结构都可以大大增强与泵浦光束共轭的噪声的放大。在小信号区域,用中性衰减片衰减信号光,增加衰减能级直到被放大信号光大于放大噪声。为了获得被放大信号光的好

的信噪比,需要入射信号远远大于这个噪声能级,除此之外,要保持放大器的增益低于放大噪声在 SBS 池达到阈值。实验研究了放大信号光能量和相位共轭能量随入射信号能量的变化关系,并指出这种技术可以被用于共轭畸变信号光,为了保持放大信号光的空间结构,信号光的直径应该小于泵浦光束。

在文献[3]中,实验研究了 Nd:YAG 的 $1.06\mu\text{m}$ 激光在低于泵浦光 SBS 阈值条件下布里渊双光束耦合,300 倍的信号光放大被实现。实验装置如图 2 所示。Nd:YAG 激光振荡器出射的脉宽 20ns、能量 4mJ 的单纵模 s 偏振光被分成相等的两束光,一束作为泵浦光入射 20cm 池长的 CS_2 池中。用 Nd glass 放大器和中性衰减片控制光强;用 $1/2$ 波片和偏振片控制偏振(入射到 CS_2 池以前也是 p 偏振态)。一束作为信号光从 CS_2 池的另一端入射,因为通过 $1/4$ 波片和盛有 CS_2 的 PCM 而具有 SBS 频移和 p 偏振态,中性衰减片用于衰减信号光的能量。两束光在空气中的夹角为 0.3° ,重叠在池中形成移动光栅使得泵浦光的能量向低频移的信号光转移。被放大的信号光直接进入光电二极管记录强度,同时,用另一个光电二极管监测泵浦光是否有 SBS 相位共轭返回光,只有两束光存在角度才可以实现这样的监测。实验测量了小信号区域不同的信号光能量下,信号光的增益随泵浦光能量的变化规律,实验中发现,尽管工作在 SBS 阈值附近,没有发现泵浦光的 SBS。在信号光能量为 $2.5\mu\text{J}$,泵浦光能量为 6.6mJ 的条件下,信号光放大了 300 倍。

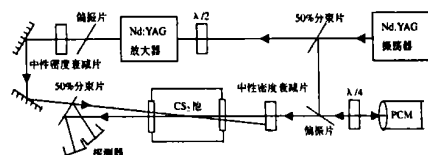


图 2 文献[3]中的实验装置

文献[4]中,研究了布里渊放大器增益和噪声特性对泵浦光束空间的依赖关系。实验中 Nd:YAG 激光振荡器和放大器系统输出的脉宽为 25ns、能量为 85mJ、频率为 10Hz 的高斯型脉冲激光,通过一个半波片夹在两个偏振片之间的衰减器后又通过一个偏振片和 $1/4$ 波片入射到 4mm 直径、20cm 长的装有 TiCl_4 的布里渊放大器中,放大器窗片与轴线成 15° 以阻止寄生布里渊振荡。来自激光器的另一束光用于产生布里渊频移信号光。它通过偏振片和 $1/4$ 波片后聚焦到 SBS 产生池,从产生池反射的 SBS 光通过中性密度衰减片由 4% 反射镜反射后又通过一个偏振片和 $1/4$ 波片入射到放大池中。被

放大的信号光通过放大池前的偏振片输出记录。实验中得到弱入射信号光(大约 0.5pJ)在高增益($G = 10^9$)布里渊放大器中输出信噪比是 85,是 4 倍的理论值。对于近衍射极限高斯型泵浦光束这些噪声随泵浦光强指数增加,并且与入射信号具有相同的增益系数。当泵浦光被畸变后,依靠畸变的性质,有效增益系数被增加了 3 倍。当激光束通过畸变器的不同区域时,增加的倍数是变化的。

在文献[5]中,从理论和实验上研究了波长为 248nm 的 KrF 激光器泵浦的布里渊放大器。实验装置如图 3 所示。窄带注入锁定振荡器产生带宽为 90MHz、能量为 0.5J 的激光,输出的 10% 被放电泵浦的 KrF 放大器放大后,一部分聚焦到布里渊产生池,产生具有 Stokes 频移的后向相位共轭光,这束光是脉宽大约为 5ns 的一串短脉冲,这束光的一部分作为信号光进入到布里渊放大池。从放大器出射的另一部分光作为泵浦光在经放大器放大后入射到布里渊放大池。布里渊放大池池长为 310cm,布里渊产生池和放大池的介质都是 SF_6 并具有相同的气压。光斑的大小是由一对 7.8mm 的光阑决定的,泵浦光和信号光的准直精度小于 1mrad。在泵浦脉冲脉宽为 24ns、强度为 $9\text{MW}/\text{cm}^2$ 、布里渊介质的气压最高约为 $1.52 \times 10^3\text{kPa}$ 、入射的 Stokes 信号光强从 $0.001\text{MW}/\text{cm}^2$ 增加到 $10\text{MW}/\text{cm}^2$ 条件下,研究了布里渊放大器系统的增益和饱和特性。在能量提取效率为 40% 时,功率增益可达到 20 倍。在研究中把实验结果与理论模拟计算结果进行了比较,在模拟计算中考虑了激光带宽的影响,实验结果与数值模拟结果是一致的。并指出在高能系统取得能量提取效率为 60%、功率增益大于 10 倍是完全有可能的。

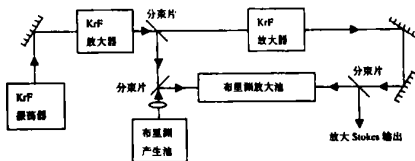


图3 文献[5]中的实验装置

在文献[6]中,从理论和实验两方面研究了信号光束在布里渊放大器中传播时横向结构的变化。倍频调 Q Nd YAG 激光器输出的脉宽为 12ns、能量为 50mJ 的激光一部分作为泵浦光入射到布里渊放大池,另一部分入射到 SBS 产生池,产生的 Stokes 频移的信号光从布里渊放大池的另一端入射到放大池中,产生池和放大池的介质都为 CS_2 。信号光的参数通过望远系统而改变。泵浦光和从放大池出射

光的横向线型用 TV 相机探测。在理论研究中,把入射激光场进行了模式分解,以确定作为非线性耦合的结果每一个模式是怎样改变的。通过理论和实验的研究得到以下结论:当泵浦光比信号光光斑宽时,信号光的横向模式结构基本上被保持,因此,这种几何结构比较适合要求保持初始模式结构的光束放大。当泵浦光比信号光光斑窄时,信号光在放大中,能量在各个模式中重新分布,引起了横向线型的变化。也就是说在高增益的限制下,与泵浦光匹配的模式将更有效的放大,使得信号光束具有与泵浦光束相似的模式结构。当泵浦光与信号光有相同的光斑大小时,具有高斯增益线型的高斯入射信号光放大后发散角大于入射信号光束的发散角。

在文献[7]中,实验研究和数值模拟了大能量 SBS 脉冲压缩。实验装置如图 4 所示。入射的波长 $1.053\mu\text{m}$ 、脉宽 15.8ns、能量

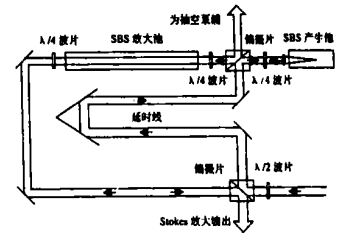


图4 文献[7]中的实验装置

25J 的激光通过 $\lambda/2$ 波片和偏振片后被分成两部分,一部分去泵浦 SBS 振荡池,其余的能量直接入射到放大池。 $\lambda/2$ 波片用来调整分束比。在振荡池和偏振片之间的 $\lambda/4$ 波片可以使 Stokes 脉冲的偏振态进行 90° 的旋转,然后通过偏振片入射到放大池。放大池两端的 $\lambda/4$ 波片可以使放大池中逆向传播的两束光具有干涉圆偏振态。放大 Stokes 脉冲由 $\lambda/4$ 波片旋转偏振态后由入射偏振片出射。放大池长为 213cm,振荡池和放大池的介质为 CCl_4 。研究表明,数值模型可以在很宽的参数范围内精确的计算脉冲压缩系统的性能。能量为 2.5J 的入射激光脉冲从脉宽 15.8ns 压缩到 1.7ns,并且具有 80% 的系统能量效率。另提出一种新的脉冲压缩方案,可以把能量 25J 的脉冲压缩到小于 1ns,且具有能量效率 80%。

在文献[8]中,从理论和实验上研究了在布里渊介质中逆向传播的信号光与泵浦光的布里渊放大的角度带宽对光谱带宽的依赖关系。理论和实验的研究表明,典型激光的角度带宽是很大的,对于单纵膜 8.5ns 脉宽的激光在 CS_2 介质中角度带宽为 $\pm 320\text{mrad}$ 。所以,可以充分利用布里渊相互作用的全角度带宽合理的设计布里渊放大器。

国内也对振放双池 SBS 进行了研究,但都是研究前面所述的第 1 种振放双池结构的 SBS,关于布

里渊放大的研究未见报道。

2 布里渊放大研究存在的问题和发展前景

从整体的布里渊放大的研究来看,人们已经从理论和实验两方面对布里渊放大进行了一定的研究。但多数的研究是在小信号区域进行的,研究的范围多是对小信号光放大中存在的问题。但是在实际应用中,需要研究高能量高功率激光的布里渊放大,在以前的研究中,虽然也有研究高能的布里渊放大问题,但是研究得不是很全面,需要对高能量的布里渊放大问题进行更加全面的研究。

受激布里渊散射应用到高功率激光时,即需要高的脉冲压缩率又需要高的相位共轭保真度。受激布里渊散射相位共轭镜使激光脉冲具有峰值功率的同时,又具有高的相位共轭保真度是可能的。高保真度相位共轭镜的结构最简单的是用聚焦透镜把光会聚到布里渊激活介质或装有液体或气体的波导中。对于高的激光功率,一些非线性过程包括光学击穿、自聚焦和热载在这种结构的相位共轭镜中很容易发生,严重破坏了 SBS 过程。在双池相位共轭镜中,产生池能够获得高保真度 Stokes 相位共轭光,在放大池中,相位共轭 Stokes 光代替了来自于自发散射的初始噪声,共轭种子光可以提高相位共

轭保真度。因此,利用双池 SBS 相位共轭镜获得高脉冲压缩率和高保真度激光是 SBS 研究的发展趋势。而利用布里渊放大池实现多脉冲合成是 SBS 研究的另一发展方向。

3 结束语

受激布里渊散射是获得高脉冲压缩率和高保真度激光的有效方法。SBS 相位共轭镜在应用中,布里渊放大池的设计是非常重要的。20 多年来,布里渊放大的研究取得了很大成绩,人们已经掌握了布里渊放大的一些基本规律,但对高能量和高功率激光的布里渊放大仍需进行全面和细致的研究工作。

参 考 文 献

- [1] Jone D C, Ridley K D, Cook G *et al.* SPIE, 1991, 1500 : 46 ~ 52.
- [2] Ridley K D, Scott A M. Opt Lett, 1990, 15 : 777 ~ 779.
- [3] Sternklar S, Jackel S, Chomsky D *et al.* Opt Lett, 1990, 15(11) : 616 ~ 618.
- [4] Scott A M, Watkins D E, Tapster P. J O S A, 1990, B7(6) : 929 ~ 935.
- [5] Offenberger A A, Thompson D C, Fedosejevs R *et al.* IEEE J Q E, 1993, 29(1) : 207 ~ 216.
- [6] Miller E J, Skeldon D, Boyd R W. Appl Opt, 1989, 28(1) : 92 ~ 96.
- [7] Dane C B, Neuman W A, Lloyd A. IEEE J Q E, 1994, 30(8) : 1907 ~ 1915.
- [8] Glick Y, Sternklar S. J O S A, 1994, B11(9) : 1539 ~ 1543.

(上接第 296 页)

3.2 点阵打标

点阵打标像打印机一样一行一行来回地打,每个像素代表电机的一步。由于计算机屏幕上像素点之间的距离是电机走一步的几倍,因此,必须放大才能得到相同大小

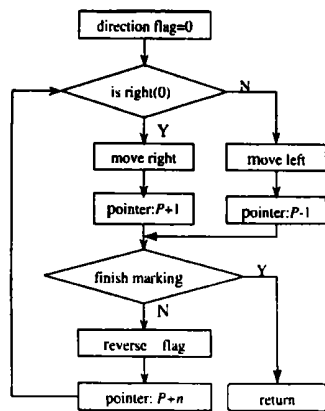


Fig. 3 The marking flow of lattice

的图像,使用的方法是常用的字符、汉字缩放处理方法,即行方向上每个点多走几步,列方向上把该行重复几次。

为了加快打标速度,采用了双向打标。设置方向标志位 flag,“0”表示向右,“1”表示向左。实现双向打标和放大的关键是数据指针的移动,重复当前行时,指针 $P+1$ 或 $P-1$,打标新行时数据指针 $P+n$, n 表示图像的一行字节数。每字节代表 8 个像素点,向左打标时,用指令 RLC A,当向右打标

时,用指令 RRC A。为了实现停止和文件打标结束激光头的归位,在内部 RAM 中开辟 4 个单元,2 个记录 x 电机向左移动的步数,2 个记录 y 电机向上移动的步数。这样,在打标停止、一次打完时,可以根据这 4 个单元的值,控制电机转动,使激光头回到起点。点阵打标流程见图 3。

4 结束语

上述的激光打标控制系统已在生产线上使用,其中的图形、图像打标方法是该激光打标控制系统的关键算法。这种控制系统在使用过程中打标精度高,运行稳定,在连续多次打标后仍能精确归位,图形图像的打标速度也很快。

参 考 文 献

- [1] 涂时亮,张友德编. 单片微机控制技术. 上海:复旦大学出版社,1994.
- [2] 汪建新,张国雄,刘晋春 *et al.* 中国机械工程,1999,10(11) : 1216 ~ 1219.
- [3] 刘传编. 多格式图像程序设计入门. 北京:人民邮电出版社,1995.