

双池布里渊放大器中 Stokes 波的高效放大

哈元清 杨经国

(四川大学物理系 成都 610064)

摘要：微小 Stokes 信号光在布里渊放大器中得到放大，当 Stokes 信号光强度为 0.15mJ 时，增益系数达到 67。Stokes 光增益决定于 Stokes 信号光强度及放大池中泵光与 Stokes 光的耦合程度，小信号 Stokes 光将得到较大的增益，并能得到较好的相位共轭效果。

关键词：受激布里渊散射 布里渊放大器 相位共轭

Effectively amplification of Stokes wave in double Brillouin cell

Ha Yuanqing ,Yang Jingguo

(Department of Physics ,Sichuan University ,Chengdu 610064)

Abstract : Stokes wave amplification in double Brillouin cell has been investigated. The experimental results shows that the gain is determined by the intensity of input Stokes signal and the coupled case with the pump beam. The gain factor of 67 and the better phase conjugation are obtained when the input Stokes intensity is 0.15mJ and at the optimum coupled case.

Key words : stimulated Brillouin scattering Brillouin amplifier phase conjugation

引 言

自 1972 年 Zel 'Dovich^[1]等使用调 Q 红宝石激光器第一次从实验上观察到受激布里渊散

射位相共轭以来,由于受激布里渊散射具有脉冲压缩及位相共轭等特征,使它得到了广泛的研究。受激布里渊散射在小信号区域内具有好的相位共轭特性,随着泵浦光的增强 Stokes 光的增益降低,最后达到饱和。增益饱和对相位共轭有较大影响,不利于在强激光系统中利用受激布里渊散射的特性^[2]。使用布里渊放大器来放大光信号受到越来越多的重视^[2~5]。利用受激布里渊散射得到微弱激光脉冲的共轭光,必须使用透镜聚焦,使入射激励光的功率密度大于布里渊介质的阈值,这样才能产生受激布里渊散射。因此,利用受激布里渊散射来修正微弱光(其功率密度低于布里渊介质的阈值)的位相畸变时受到限制。利用布里渊增强四波混频能得到微弱脉冲激光的位相共轭^[5]。四波混频过程中当泵浦光被耗尽前,共轭光经历了正反馈并以指数增长,所以,它具有高反射率,但是,自发散射也要经历同样的过程,即噪声也得以放大,因此,在四波混频过程中,对弱光而言,共轭光和噪声具有相同的量级。作者使用双池布里渊散射配置,第一布里渊池产生布里渊种籽光,即 Stokes 信号光,种籽光入射到第二布里渊池(Stokes 光放大器),注意到第二池的泵浦光强度低于介质布里渊阈值,则由第一池出射的 Stokes 信号光(频率为 ω_s)在放大池中与泵光(频率为 ω_p)相耦合,由于两波之间的频差恰为布里渊频移,该两波在放大池中相互作用时能够驱动声波,并将泵浦光能量转移到 Stokes 信号光中去,引起信号光的指数放大。被放大的信号光与入射泵浦激光在同一波面上具有相位共轭关系。可见,利用布里渊放大器不仅放大了微弱的 Stokes 信号,而且它能够产生更好的相位共轭效果。和传统的激光放大器相比,布里渊放大器具有相位共轭特性和较窄的带宽,因而可克服传统放大器中出现的相位畸变。在以丙酮为布里渊介质的双池布里渊放大实验中,Stokes 信号光得到了高效放大,小信号增益系数达到 67,并得到理想的位相共轭效果。

1 实验及主要结果

实验装置见图 1。染料(BDN)调 Q Nd:YAG 激光作泵浦源,波长 $1.06\mu\text{m}$,脉冲宽度 10ns,输出能量 $\sim 80\text{mJ}$,重复频率 0.5Hz。低重复率工作时,晶体可充分冷却,有效地降低了热透镜效应的影响^[6]。SBS 震荡池和放大池尺寸均为 $200\text{mm} \times \text{O}20\text{mm}$,内盛分析纯丙酮。端面倾斜放置,以避免端面反射光干扰实验结果。M, M_1 , M_2 均为 $1.06\mu\text{m}$ 全反镜。BS₁ 为 $1.06\mu\text{m}$ 处反射率 10% 的分束器;BS₂, BS₃ 均为 $1.06\mu\text{m}$ 处反射率 10% 的分束器。D 为可调衰减器。TS 为测量系统,对于不同目的的实验,TS 的具体配置不同。Nd:YAG 脉冲激光经 BS₁ 分束器分束,40% 的反射光经透镜 f_1 (100mm) 汇聚后进入 SBS 振荡池,以产生受激布里渊散射。从布里渊震荡池产生的背向 Stokes 光经 BS₂, M 和 D 后进入布里渊放大池,作为 Stokes 信号光。经分束器 BS₁ 透射的 60% 的入射激光经 M 和 BS₃ 后,作为泵浦激光进入布里渊放大池。Stokes 信号光和泵浦光在放大池中相互作用,使 Stokes 光得到放大。借助小孔 A₂ 和 A₃ 作为参考,调节全反镜 M₁ 和 M 的位置和角度,使得泵浦光和 Stokes 光在布里渊放大池中重合。适当调节全反镜 M₂ 的位置可使分束器 BS₃ 反射的激光和 Stokes 信号光重合,共同进入测试系统 TS。

1.1 入射激光线宽、Stokes 线宽及 SBS 转换率测定

采用 CCD-OMA 测量系统。由于普通多色仪的分辨率达不到测量布里渊频移所要求的分辨率,因而在多色仪前面加 F-P 标准具,以提高分辨本领。实验所用 F-P 标准具自由光谱范

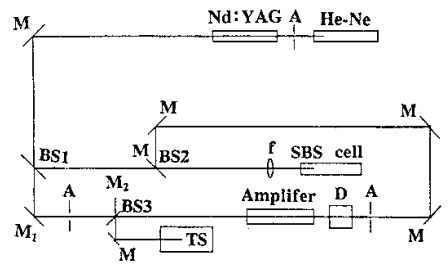


Fig.1 Schematic diagram of the experiment setup

围 $\Delta\nu_{fsr} = 1\text{cm}^{-1}$ 。在图 1 中,使通过放大池被放大的 Stokes 光和泵浦光同时进入 F-P 并由 CCD 探测器转换光信号为电信号 经计算机处理得到 F-P 谱。所得 F-P 谱图如图 2 示。其中主峰为激光脉冲,与激光脉冲相伴的另一小峰是 Stokes 线。布里渊频移为 0.146cm^{-1} ,Stokes 光转换效率达到 $\sim 50\%$ 。

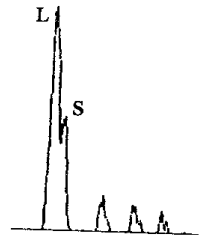


Fig.2 The spectrum of laser and Stokes

1.2 Stokes 光的放大及增益饱和

实验中,用强流光电管和可记忆示波器探测信号光及被放大的

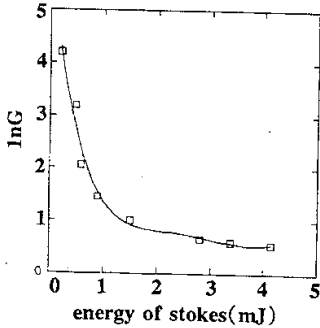


Fig.3 The gaining curve of Stokes

Stokes 光强度。首先挡掉进入放大器的泵浦激光,移去放大池,示波器测得 Stokes 信号光强度;然后,加入放大池,使得泵浦激光和 Stokes 信号光分别以相反方向通过放大池并完全重合,此时,从示波器上得到的脉冲信号为经布里渊放大池放大的 Stokes 光。通过调节衰减器 D 来改变 Stokes 信号光的强弱,测出被放大的信号光的增益如图 3 所示。横轴代表 Stokes 信号光强度,单位为 mJ;纵轴为增益系数 G 的自然对数

$$\ln G = \ln(I_{as}/I_s) \quad (1)$$

I_{as} 为被放大的 Stokes 光强度、 I_s 为 Stokes 信号光强度。

从图 3 中可以看出信号光强度较弱时,其增益很大,当 Stokes 信号光为 0.15mJ 时,其增益系数可达 67。Stokes 信号光在 $0.15 \sim 1.2\text{mJ}$ 之间,其增益呈指数下降;当 Stokes 信号光大于 1.2mJ 以后,其增益降低并逐渐趋于饱和。测量入射泵浦激光的光斑半径为 $\varphi = 6\text{mm}$,布里渊放大池长 20cm ,当泵浦光和 Stokes 信号光之间的夹角 $\theta = 2^\circ 6'$ 时,两束光在放大池中完全分离。定义两光束的耦合系数 K 为:

$$K = V_m/V_p \quad (2)$$

式中, V_m 为两光束在放大池中重合的体积, V_p 为泵浦光在放大池中的体积。

图 4 为两光束的耦合系数 K 和 Stokes 信号光增益的自然对数 $\ln G$ (同(1)式)之间的关系。横轴代表两束光的耦合系数 K ,当 $K = 1$ 时,说明两光束完全重合;当 $K = 0$ 时,完全分开。由图 4 中可知,当 $K = 1$ 时,信号光增益最大。当 $K = 0$,即两光束完全分开时,信号光在放大池中无增益。当耦合系数 K 在 $1 \sim 0.8$ 之间时,增益系数降低较慢,当 K 在 $0.8 \sim 0$ 之间时,信号光的增益降低较快。这是由于泵浦激光将一部分能量转移给 Stokes 信号光。可见,信号光在放大池中得到放大源于泵浦激光的贡献。在布里渊放大过程中,其放大本领不仅决定于 Stokes 信号光和泵浦激光的强弱,而且决定与两光束的耦合程度。

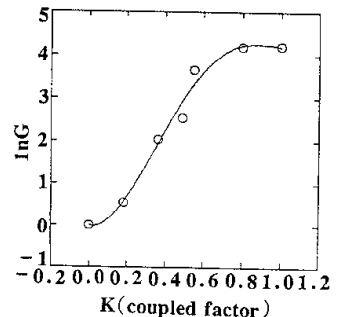


Fig.4 The gaining curve of pump light and Stokes

2 结论与讨论

使用双池布里渊配置,第一布里渊池产生 Stokes 信号光(频率为 ω_s),当 Stokes 信号光入射到第二布里渊池,与泵光(频率为 ω_p)相耦合,由于两波之间的频差恰为布里渊频移,该两波在放大池中相互作用时驱动声波,并将泵浦光能量转移到 Stokes 信号光中去,引起信号光的

指数放大。对于稳态布里渊放大器,其输出 Stokes 光应满足以下耦合方程^[6]:

$$\partial I_s / \partial z = s I_p d\Omega + g I_p I_s \quad (3)$$

式中, I_s 和 I_p 分别表示 Stokes 信号光和泵浦光强度; $s d\Omega$ 表示在立体角 $d\Omega$ 内的自发散射系数; g 是布里渊介质增益系数。当输入信号光强度为 I_{s0} 时,求解(2)式得输出 Stokes 光强 $I_s(L)$ 为:

$$I_s(L) = s d\Omega [\exp(g I_p L) - 1] + I_{s0} \exp(g I_p L) \quad (4)$$

式中, L 是 Stokes 信号光与泵浦光在放大池中的相互作用长度。在忽略增益损耗和稳态条件下,微弱的 Stokes 信号光的增益系数为:

$$G = \exp(g I_p L) \quad (5)$$

可见,在布里渊放大器中 Stokes 波可得到指数放大,其增益与泵浦强度 I_p , 泵浦光与 Stokes 信号光在放大池中的相互作用长度 L 及介质的布里渊增益系数 g 密切相关。当 $g = 0.13 \text{ cm/MW}$, $I_p = 1.8 \text{ MW/cm}^2$, $L = 20 \text{ cm}$ 时, $G = 108$ 。与实验结果 $G = 67$ 相比稍大,主要是由于理论计算中忽略了增益损耗所致。

受激布里渊散射是由于激光与介质声振动激发场之间的参量耦合而引起,从非线性麦克斯韦方程出发,在缓变振幅近似下,得到非线性耦合波方程。在小信号近似和略去介质对光的吸收的近似条件下,求解耦合波方程可得^[7]:

$$|S(z)\rangle = \alpha(0) \exp(gz) |P^0\rangle / I_p^0 \quad (6)$$

式中, $|S(z)\rangle$ 、 $|P^0\rangle$ 为狄拉克符号,分别表示 Stokes 波在 z 方向任一处的列矢量和泵光在 z 为 0 处的列矢量, z 为泵光在放大池中的传播方向,入口处 z 为 0; I_p^0 为 z 等于 0 时泵光强度; g 为布里渊活性介质的增益系数; $\alpha(0)$ 为 Stokes 波和泵浦光波在 $z = 0$ 处的相关函数,表示为:

$$\alpha(0) = P^0 |S^0\rangle \quad (7)$$

Stokes 波和泵浦光在 z 处的强度分别为:

$$I_s(z) = |S(z)\rangle |S(z)\rangle \quad (8)$$

$$I_p(z) = |P(z)\rangle |P(z)\rangle \quad (9)$$

因而,由(6)式可得: $(|S_1^0\rangle, |S_2^0\rangle, \dots, |S_N^0\rangle) = \alpha(0) \exp(gz) (|P_1^{0*}\rangle, |P_2^{0*}\rangle, \dots, |P_N^{0*}\rangle) / I_p^0$ (10)

($|S_1\rangle, |S_2\rangle, \dots, |S_N\rangle$) 为 $z = 0$ 时的 Stokes 波 ($|P_1^{0*}\rangle, |P_2^{0*}\rangle, \dots, |P_N^{0*}\rangle$) 为 $z = 0$ 处泵浦光的共轭光。

由(9)式可见,在小信号近似下,受激布里渊散射背向散射光与入射泵浦光位相共轭。

上述结果表明,由布里渊振荡器产生的 Stokes 信号光进入布里渊放大器,同时在布里渊放大器的相反方向注入泵浦光,微小的 Stokes 信号光将得到放大,其增益决定于入射 Stokes 种籽光的强弱以及放大池中泵光与 Stokes 光的耦合程度,小信号 Stokes 光将得到较大增益,并有较好的相位共轭效果。

参 考 文 献

- 1 Zel'Dovich B Y, Popovichev V I, Ragul'Skii V V *et al.* Sov Phys J E T P, 1972; 15: 109
- 2 Andreev N F, Bespalov V I, Dvoretzky M A *et al.* Rev Roum Phys, 1986; 31: 951
- 3 Fedosejevs R, Tomov I V, McKen D C D *et al.* Appl Phys, 1984; 45: 340
- 4 Sternklar S, Jackel S, Chomsky D *et al.* Opt Lett, 1990; 15: 616
- 5 Riddley K D, Scott A M. Opt Lett, 1990; 15: 777
- 6 Scott A M, Watkins D E, Tapster P. J O S A, 1990; B7: 929
- 7 Hu P H, Goldstone J A, Ma S S. J O S A, 1989; B6: 1813

* * *

作者简介 哈元清,男,1964年出生。硕士,讲师。现主要从事受激布里渊散射及光电子研究。