

受激布里渊散射相位共轭波的四波混频放大

陈 慰 宗

M. J. Damzen

(西北大学 物理系, 西安 710069)

(伦敦帝国理工学院 Blarkett 实验室)

提 要

本文介绍了一种产生相位共轭波的方法。此方法兼有四波混频方法和受激布里渊散射方法的优点, 可得到转换效率大于1的高质量的相位共轭波。

关键词: 偏振解耦合, 四波混频, 受激布里渊散射。

一、引 言

受激布里渊散射普遍用于光学相位共轭中, 是因为它可以产生波前的自逆转。但是这种方法有两个主要的缺点, 一是信号光的强度必须大于受激散射的阈值, 二是信号的反射率, 也就是受激布里渊散射的转换效率总是小于1的。这些缺点都可以用把四波混频的方法和受激布里渊散射的方法相结合来加以克服。四波混频也是产生相位共轭波的方法之一, 它可以得到光波的增益。这两种方法相结合, 互相取长补短, 具有很多优点。有人把这一方法叫作四波混频增强的布里渊散射^[1]。

对于小于受激布里渊散射阈值的小信号, 可以用这个方法得到它的相位共轭波。对于高于阈值的信号, 可以提高其转换效率。本文研究后一种情况。

二、实验原理

这种方法是设计两个液体池, 一个是产生受激布里渊散射的, 叫作散射池, 另一个是作

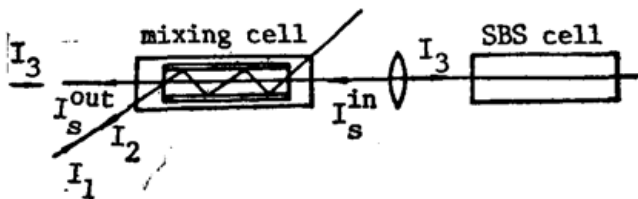


Fig. 1 A simplified schematic diagram

四波混频用的, 记作混频池。两个池子装有相同的非线性介质。如果要得到信号光束 I_3 的相位共轭波, 可使 I_3 先穿过混频池, 然后会聚进入散射池。如图 1 所示。

光束 I_3 不会聚时, 其功率密度小于受激布里渊散射的阈值, 会聚时大于受激布里渊散射的阈值。因此光束 I_3 在散射池中产生的后向受激布里渊散射光束 I_s 就沿着与 I_3 相反的方向进入混频池, I_s 是 I_3 的相位共轭波。这时相位共轭波的转换效率 $\eta_{SBS} = (I_s/I_3)$, 也就是受激布里渊散射的转换效率, 一般总是小

于 1 的。为了提高 I_s 的强度，在混频池中加入另一束强光束 I_1 ，并把从右方进入混频池的 I_s 叫作 I_s^{in} ，而从池子左方输出的 I_s 叫作 I_s^{out} ，尽量使两个池子靠近，使输入的三个光脉冲 I_3 、 I_s^{in} 和 I_1 在时间上重合，并在混频池中发生混频作用，产生 I_2 、 I_2 是 I_1 的相位共轭波，是四波混频的结果。在这个过程中，能量由 I_1 传输给 I_s^{in} ，使得 $(I_s^{out}/I_s^{in}) \gg 1$ ，从而 $(I_s^{out}/I_s) > 1$ 。这样，就使信号波 I_s 的相位共轭波 I_s 的转换效率大于 1。

在四波混频过程中，由于泵浦光之间的相互作用，会大大降低 I_s 的放大倍数，因此采用“偏振解耦”的方法^[2]，即适当选择相互作用的偏振方向，使参考光束的偏振方向互相垂直而不能相互作用，这样使能量尽可能多地由 I_1 转向 I_s^{in} 。其偏振方向的选择如图 2 所示。

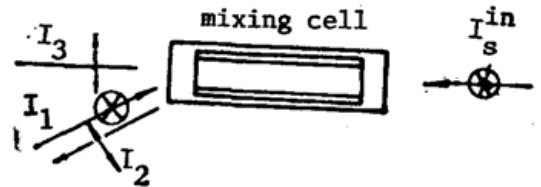


Fig. 2 Polarizations of the interacting waves

为了得到最有效的转换，我们希望一方面得到大的放大率 $A(A = (I_s^{out}/I_s^{in}))$ ，另一方面 I_1 要有较大的耗尽，定义 $D = [(I_1^{in} - I_1^{out})/I_1^{in}]$ ，用 D 来衡量 I_1 被耗尽的程度。 I_1^{in} 是 I_1 未进入混频池时的强度， I_1^{out} 是 I_1 经过四波混频后，走出混频池时的强度。

另外再定义 $\eta_1 = (I_s^{out}/I_s)$ ， η_1 表示 I_s 的相位共轭波 I_s^{out} 的转换效率。如果忽略光在各个表面及液体中的损耗。

$$\eta_1 = \frac{I_s^{out}}{I_s} = \frac{I_s^{out}}{I_s^{in}} \cdot \frac{I_s^{in}}{I_s} = A \cdot \eta_{SBS} \quad (1)$$

为了检验 I_1 光束的质量对 I_s 相位共轭特性的影响，可取 I_3 是高质量光束，而在 I_1 的光路中放一片位相板，(用 HF 腐蚀过的玻璃片)。使 I_1 变成畸变了的发散光束，其发散角大约为 2×10^{-2} rad，再用会聚透镜，使位相板被照亮的部分成像在混频池中。然后在远场观察 I_s^{out} 、 I_s^{in} 及 I_1 的光斑结构。

三、实验装置

实验中用的光源是调 Q 的 YAG 激光器，工作在单模情况下，倍频输出的最大平均功率可达 120 mW 左右， $\lambda = 0.532 \mu\text{m}$ 。脉冲宽度为 12 ns，实验装置简图如图 3 所示。激光

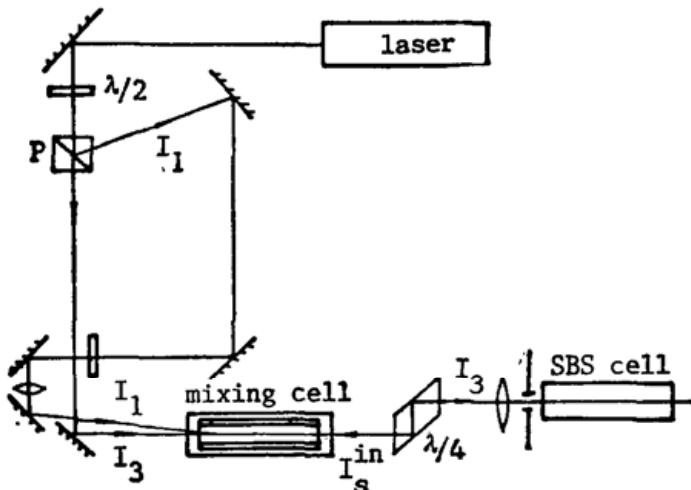


Fig. 3 Experimental arrangement

输出经过起偏器 P_1 分成两束光 I_1 和 I_3 。用一个 $\lambda/2$ 片控制两束光的强度比例 β 。 I_3 是水平偏振光，它穿过混频池，经 $\lambda/4$ 片(菲涅耳棱镜)会聚进入散射池， I_3 在散射池中激发的后向散射波 I_s 沿 I_3 的反方向传播，当它再次通过 $\lambda/4$ 片时，偏振方向与原来 I_3 的偏振方向转了 90° ，变成竖直偏振的，这就是 I_s^{in} ，它和 I_s 组成一对参考波，偏振方向相互垂直。光束 I_1 是竖直偏振的。

在 I_1 和 I_3 的光路中各放入一个望

远镜系统, 分别调节 I_1 和 I_3 光束的截面积, 并适当选择激光输出的总能量以及 I_1 和 I_3 的比例, 调节 I_1 光束的强度, 使 I_1 略小于受激布里渊散射的阈值, 即当 I_1 单独进入混频池时, 并不产生受激布里渊散射。这样 I_2 的出现完全是由于四波混频的结果, 而不是 I_1 的后向散射波。

本实验使用的非线性介质是二硫化碳(CS_2)混频池用的是截面为 $2 \times 3 \text{ mm}^2$ 的波导管, 以使相互作用的光束在空间尽量多地重合。

1. 测量耗尽度 D

信号的检测是采用光电管接收, 用高频存贮示波器测出各个信号的相对值。在混频池的左边, I_3^{out} 的光路中放一块楔形镜, 让 I_3^{out} 光束部分反射进入光电管, 在示波器上可读出 I_3^{out} 的峰值高度, 挡住 I_1 , 使 I_1 不进入混频池, 可测出 I_3^{in} , 让 I_1 通过混频池, 可测出 I_3^{out} , 从而得到 $A = (I_3^{\text{out}}/I_3^{\text{in}})$ 。在混频池的右边, I_1 出来的光路中放一块楔形镜, 使 I_1 光束部分反射进入光电管, 挡住 I_3 时, 可测出 I_1^{in} , 不挡 I_3 时, 可测出 I_1^{out} , 从而计算出 D 。

2. 测量转换效率 η_{SBS}

在散射池后边放一个光电管, 移走散射池, 可测出 I_3^{in} , 放入散射池, 让通过散射池, 可测出 I_3^{out} , 从而算出 $\eta_{\text{SBS}} = [(I_3^{\text{in}} - I_3^{\text{out}})/I_3^{\text{in}}]$ 。

另外, 用能量计可测出 I_1 和 I_3 光束的能量。

在实验中, 还应该考虑各端面的反射及介质的吸收等损耗, 作者曾测出两个主要的损耗, 一个是光束通过混频池的损耗 γ , γ 约为 10%, 另一个是光束通过菲涅耳棱镜和会聚透镜的损耗 α , α 约为 15%。在这个实验中, 测量 I_3^{in} 、 I_3^{out} 、 I_1^{in} 和 I_1^{out} 时是包括了这些损耗的, 只是在计算 η_1 时, 应改为

$$\eta_1 = (1 - \alpha)^2 (1 - \gamma) A \eta_{\text{SBS}} \approx 0.65 A \eta_{\text{SBS}}$$

四、实验结果与讨论

1. A 、 D 和 η_1 等量随 I_3^{in} 的变化

令 I_1 和 I_3 的能量保持不变, 每个脉冲 I_1 约为 10.3 mJ, I_3 约为 0.6 mJ。 I_3^{in} 由小到大

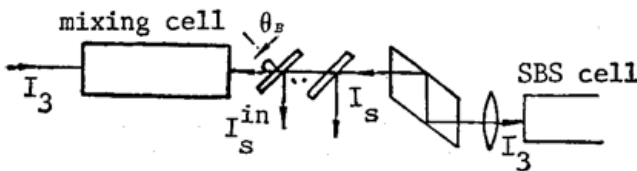


Fig. 4 To vary I_3^{in} with a group of suides

逐渐变化, 方法是在混频池和菲涅耳棱镜之间, 以布儒斯特角放置数片玻璃片, 如图 4 所示, 由于 I_3 是水平偏振的, 它可以无反射损耗地通过玻片堆进入菲涅耳棱镜和散射池, 而从散射池反射回来的受激布里

渊散射信号 I_3^{in} , 由于两次通过菲涅耳棱镜, 偏振方向变成竖直的, 因此从玻片堆上反射掉一部分能量, 使进入混频池的 I_3^{in} 减小, 玻片数目越多, 减小得越多, 设玻片堆的透过率为 T 。用光电管和示波器测出各种情况下的 I_3^{in} 、 I_3^{out} 、 I_1^{in} 、 I_1^{out} 等值, 计算出 A 、 D 、 T 和 η_1 , 其结果列在表 1 中, 其中 I_3^{in} 的值是从示波器上读出的相对值, η_1 是由 $\eta_1 = 0.65 A \eta_{\text{SBS}} \cdot T$ 计算出的值, 测得的 η_{SBS} 的值约为 0.88。

从结果可以看出, 随着进入混频池的 I_3^{in} 的增强, 光束 I_1 的耗尽加大, η_1 增大, 说明有更多的能量由 I_1 转移到 I_3^{in} 。在 I_3^{in} 很小的情况下, 虽然 I_3^{in} 的放大倍数 A 较大, 但是 I_1 光束

Table 1 Variation of A , D , T and R_1 with I_s^{in}

| I_s^{in} | A | D | T | $\eta_1 = 0.65\eta_{SBS}T$ |
|-------------|----|------|------|----------------------------|
| 4.5 x 0.01 | 80 | 0.40 | 0.06 | 2.7 |
| 5.6 x 0.02 | 50 | 0.35 | 0.15 | 4.2 |
| 8.5 x 0.02 | 35 | 0.52 | 0.23 | 4.5 |
| 9.5 x 0.02 | 28 | 0.53 | 0.25 | 4.1 |
| 13.0 x 0.02 | 22 | 0.63 | 0.35 | 4.4 |
| 11.0 x 0.05 | 11 | 0.64 | 0.73 | 4.6 |
| 7.5 x 0.1 | 8 | 0.65 | 1.00 | 4.6 |

Table 2 Variation of A , D , and R_1 with I_1

| I_1 (mJ) | A | D | η_{SBS} | $\eta_1 = 0.65A\eta_{SBS}$ |
|------------|----|------|--------------|----------------------------|
| 3.2 | 5 | 0.23 | 0.66 | 2.1 |
| 6.4 | 16 | 0.31 | 0.66 | 6.8 |
| 9.2 | 25 | 0.38 | 0.66 | 10.7 |
| 12.0 | 31 | 0.56 | 0.66 | 13.3 |

的耗尽较小, 从而 I_3 光束的相位共轭波 I_s^{out} 的转换效率 η_1 不够高, 这说明要得到有效的转换, 除了 I_1 光束要足够强以外, I_s^{in} 也要有足够的强度。

表 2 所列的数值是当 I_3 及 I_s^{in} 保持定值, 而让 I_1 从小到大逐渐变化。 I_3 每个脉冲的能量约为 0.3 mJ。测出相应的 A 、 D 和 η_{SBS} 等值, 计算出 η_1 , 图 5 表示出 A 、 D 和 η_1 随汞浦光 I_1 的变化, 当 I_1 光束的损耗增大时, A 与 η_1 出现饱和的趋势。

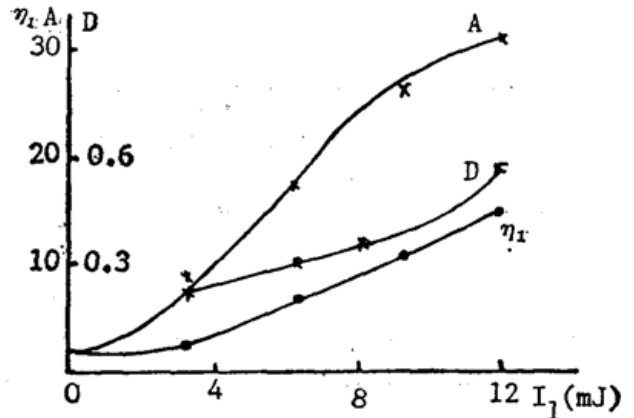


Fig. 5 Variation of A , η_1 and D with I_1

2. 光束 I_1 的质量对信号的放大及相位共轭特性的影响

在 I_1 的光路中放入一片被 HF 腐蚀过的玻璃片, 而让 I_3 仍然保持高质量, 像上面采用的方法一样, 让 I_s^{in} 从弱到强逐渐变化, 测出 A 、 D 和 T 等值, 结果如表 3 所列, 其中 I_s^{in} 的量值是从示波器上读出的相对值, 与表 1 中的 I_s^{in} 没有对应关系。测得的 η_{SBS} 约为 0.60。结果表明, 即使在 I_1 被畸变的情况下, 仍能得到 I_s^{in} 的放大以及大于 1 的。

3. 在远场观察各光束的发散角及光斑结构

在两米外的远场用屏观察 I_3 和 I_s^{in} 的光斑都是一个圆斑, 与激光本身的发散角一样。 I_1 光束在没有畸变前, 具有激光的发散角, 经过位相板以后, 在两米外的光斑是一个直径为 10 cm 的散射斑, 平面发散角约为 5×10^{-2} rad。

放大后的信号 I_s^{out} , 在两米外观察它的光斑结构, 其中心是一个非常明亮的圆形光斑, 其尺寸与 I_s^{in} 大致相同, 周围环绕着一些小的亮点, 称之为噪音。用小孔挡住这些噪音, 单独

Table 3 Variation of A , D and η_1 with I_s^{in} when I_1 was distorted

| I_s^{in} | A | D | T | $\eta_1=0.65A \cdot R_{\text{SBS}} \cdot T$ | I_s^{out}/I_2 |
|-------------------|----|------|------|---|------------------------|
| 4.5 x 0.05 | 18 | 0.17 | 0.28 | 2.0 | 32 |
| 7.0 x 0.05 | 16 | 0.23 | 0.44 | 2.7 | 30 |
| 10.0 x 0.05 | 9 | 0.32 | 0.63 | 2.2 | 52 |
| 8.0 x 0.1 | 7 | 0.35 | 1 | 2.7 | 55 |

测量中心光斑的能量及整个光斑的能量,发现噪音部分的能量是非常微弱的。说明被放大的信号 I_s^{out} 基本上保持了高质量。即可用质量不高的强光束作为放大器的泵浦光,而不影响放大的效果。

4. 偏振方向避免了参考光之间的相互作用,对 I_s^{in} 光束的放大有利

实验测出了 I_s^{out} 和 I_2 的比值,其方法是在混频池左边的 I_1 和 I_3 光路中放两块平板玻璃,反射出一部分 I_2 和 I_s^{out} 的信号,尽量使玻片与光线垂直,由于 I_1 和 I_3 的夹角很小,可认为它们是以相同的,近似垂直的角度反射出信号,反射系数相同,使反射出的两个信号进入同一个光电管的同一点上,可认为接收条件完全相同,挡住其中一个测出另一个,可求出其比值,结果列在表 3 的最后一列。结果表明, I_s^{out} 比四波混频的产物 I_2 要大得多。同时在实验中也并没有发现 I_3 光束在穿过混频池后有明显的耗尽。

五、结 论

从这个实验可以证明,用四波混频和受激布里渊散射相结合的方法,可以得到转换效率大于 1 的高质量的相位共轭波而不受泵浦光的光束质量的限制。偏振解耦合的方法是得到高的转换效率的有效方法。

参 考 文 献

- [1] M. J. Damzen, M. H. R. Hutchinson et al.; *Opt. Lett.*, 1987, 12, No. 1 (Jan), 45~47.
 [2] V. E. Efimkov, I. G. Zubarev et al.; *Soviet J. Quant. Electron.*, 1984, 14, No. 2 (Feb), 209~213.

A SBS amplifier in phase conjugation by FWM

CHEN WEIZONG

(Department of Physics, Northrest University)

M. J. DAMZER

(Blackett Laboratory Imperial college London SW7 2BZ, England)

(Received 8 November 1989 revised 3 April 1990)

Abstract

A method of producing a phase-conjugate wave is presented which has the virtues of both four-wave-mixing and stimulated Brillouin scattering. A high-quality phase-conjugate wave with a conversion efficiency of greater than unity was obtained.

Key words: polarization decoupling, four-wave-mixing, stimulated Brillouin scattering.