

叶绿素中用简并的四波混频产生 位相复共轭后向反射波*

吴存恺 范俊颖 王志英

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文报道在叶绿素溶液中用简并的四波混频得到位相复共轭后向反射波的首次实验。实验表明,转换效率在作用长度为 5 毫米时达 22%,这是一种高效率的四能级系统。在泵浦波强度恒定的情况下,入射物波强度与复共轭反射波强度成线性关系。研究了后向反射波的位相复共轭特性。在有畸变(相位和振幅的)介质存在时,由于这种位相复共轭特性仍能获得金属丝网格高质量的再现现象。

引 言

用简并的四波混频过程可以得到原始物波的位相复共轭后向反射波的概念,最近引起了人们的普遍关注。这不仅是由于它在信息处理中具有直接意义,而且对于改善高功率激光器输出质量提供了一种新方法^[1-3]。

1977 年 Hellwarth^[4] 首先提出简并的四波混频概念。近一、二年人们对许多透明介质和近共振或共振吸收介质研究了位相复共轭特性。首先在具有大的光克尔非线性介质 CS_2 中观察到简并的四波混频作用^[5,6]。后来在吸收介质中实现了简并的四波混频作用^[7-9]。我们首先提出和实现了四能级有机染料溶液的简并的四波混频作用^[10]。这种四能级系统克服了二能级和三能级系统的缺点,利用位相复共轭特性,获得再现现象的质量好于 6 条/毫米,转换效率高于 10%^[11]。

本文报道叶绿素 A 甲醇溶液中简并的四波混频作用。这是一个高效率的四能级系统。当介质长度为 5 毫米时,介质的非线性反射率达 22% 以上。我们研究了后向反射波的位相复共轭特性。利用这种位相复共轭补偿特性,我们得到物波再现现象的分辨率好于 6 条/毫米。并且在有位相和振幅畸变介质存在的情况下,仍能得到好的再现现象。

利用四波混频得到位相复共轭后向波的基本过程如图 1 所示,其中 A_1 , A_2 , A_3 和 A_4 分别为作用于非线性介质上的四个光波场的复振幅,相应的波矢量分别为 k_1 , k_2 , k_3 和 k_4 , 频率分别为 ω_1 , ω_2 , ω_3 和 ω_4 。这时非线性极化强度 $P^{(NL)}$ 可表示为

* 1979 年 2 月 23 日收到。

$$P^{(NL)}(\omega_4 = \omega_1 + \omega_2 - \omega_3) = \frac{1}{2} \chi^{(3)} A_1 A_2 A_3^* \exp i[\omega_4 t - (\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_3) \cdot \mathbf{r}], \quad (1)$$

$$P^{(NL)}(\omega_3 = \omega_1 + \omega_2 - \omega_4) = \frac{1}{2} \chi^{(3)} A_1 A_2 A_4^* \exp i[\omega_3 t - (\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_4) \cdot \mathbf{r}]. \quad (2)$$

当(1)式和(2)式中有 $\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 = 0$ 时, 动量守恒要求有 $\mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_4 = 0$. 并且当 $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ 和 $\omega_4 = \omega$ 时, 必定有 $\omega_3 = \omega$, 即为简并的四波混频. 由(1)式和(2)式可知, $A_4(r) \propto A_3^*(r)$.

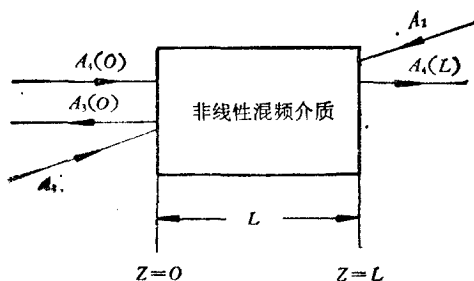


图1 简并的四波混频原理图

在绝热近似下求解耦合波方程

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} + \frac{\epsilon}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \frac{4\pi}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} P^{(NL)}, \quad (3)$$

可以得到 $A_3(r)$ 和 $A_4(r)$ 的解. 于是求得在 $z = 0$ 处 $A_3(0)$ 和 $A_4^*(0)$ 的关系式为

$$A_3(0) = -i \left(\frac{\kappa^*}{|\kappa|} \tan |\kappa| L \right) A_4^*(0), \quad (4)$$

及

$$\kappa = \frac{2\pi\omega}{cn} \chi^{(3)} A_1 A_2, \quad (5)$$

式中 n 为介质的折射率, L 为介质有效作用长度. 这样一来, 可以得到非线性介质的反射率为

$$R = \frac{I_3}{I_4} = \tan^2 |\kappa| L. \quad (6)$$

因此测量介质的非线性反射率就可知道介质的非线性折射率.

实 验

我们采用如图2所示的实验装置. 激发源是石榴石掺钕 1.06 微米波长激光, 经 KDP 倍频后 5320 埃绿光半最大全宽度 ~ 7 毫微秒. 此光束经楔形分束器 1 分光, 透射光束经光程补偿器 3, 长焦距 ($f = 1.3$ 米) 透镜 4 及光阑 5 投射到介质盒 8 内, 此光束记为 A_1 . 楔形分束器 1 的反射光束经全反射镜 2, 取样镜 6 和长焦距 ($f = 1$ 米) 透镜 7 也投射到介质盒 8 上, 此光束为物光束, 记为 A_4 . A_1 和 A_4 光束成一小的夹角. 调节反射镜 2 使它们在介质盒中相交. 在我们的实验装置中, A_1 和 A_4 的夹角约为 6.2×10^{-2} 弧度. 光束

A_1 透过介质盒后, 经全反射镜 9 反射, 调整 9 使反射光束沿着 A_1 的反方向传播, 此光束记为 A_2 . 在实验中使 A_2 光束返回到光阑 5 中, 后向反射波用透射反射比为 1:1 的楔形镜 6 取样, 并用光电倍增管 10(IP28) 接收, 其输出用 AC15/2 直流复射式检流计 11 检测. 在大多数实验中, 光束 A_1 与 A_4 的强度比近似为 3:1. 光电检流计用 LCA 精密能量卡计定标.

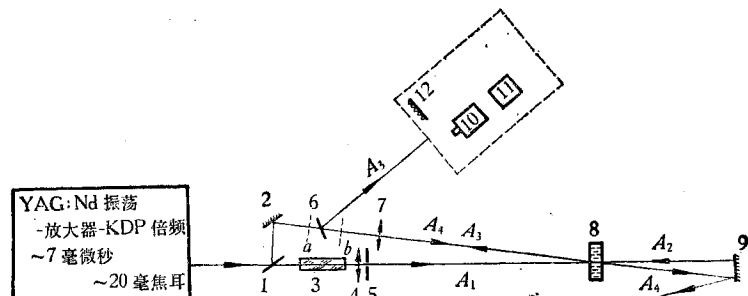


图 2 简并的四波混频实验装置

1——分束器; 2——反射镜; 3——光程补偿器; 4——透镜; 5——光阑;
6——取样镜; 7——透镜; 8——介质盒; 9——反射镜; 10——光电倍增
器; 11——光电检流计; 12——照相机

实验所使用的非线性介质是叶绿素 A 甲醇溶液, 溶液浓度 $\sim 10^{-5}$ 克分子. 介质盒厚度 9 毫米, 溶液层厚度 5 毫米. 各光束能量由 LCA 型精密能量卡计检测, 其灵敏度为 8 毫焦耳/毫焦耳. 在大多数实验条件下, A_1 束的能量为 8 毫焦耳, 物波 A_4 束(未放置物时最高能量)的能量为 2.5 毫焦耳.

实验中所用的物是 0.18 毫米(或 0.3 毫米)方孔的金属丝栅网. 我们拍摄了物波场和复共轭反射波场. 研究了有复共轭波面补偿和无复共轭波面补偿时网格物的再现现象. 研究了在 A_4 光路中加入严重畸变(不仅有位相畸变, 还有振幅畸变)介质时, 有复共轭波面补偿和无复共轭波面补偿的再现现象.

保持 A_1 束的强度不变, 改变物波强度 I_4 , 测量复共轭后向反射波强度 I_3 , 从而可得非线性反射率 R .

图 3 为物波场和复共轭反射波场的照片. 由于照相记录仅能记录强度, 所以图 3 中所显示的场的结构相同. 照片中的微小差别是由于激光器输出时间和空间特性的不稳定.

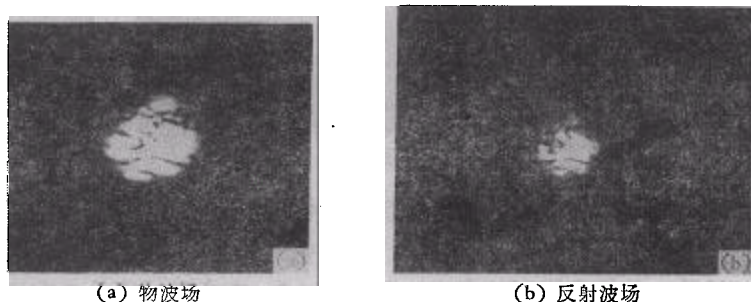
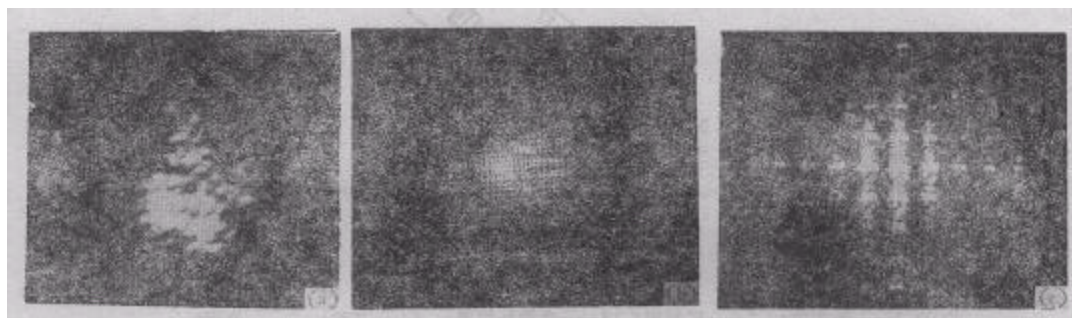


图 3

把金属丝网格置于图 2 中 a 处, 拍摄物波的再现现象, 这时复共轭反射波不通过物, 因此无复共轭波面补偿. 把网格物置于图 2 中的 b 处, 拍摄物波再现现象, 这时复共轭反射波通过物, 因而其再现现象经过了复共轭波面补偿[由图 4(a) 和 (b) 示出]. 图 4(c) 是当 0.18 毫米方孔网格物置于 a 或 b 处时, 在介质盒处的象, 显然, 这是物的衍射象. 由图 5 可以明显看到, 由于复共轭反射波的补偿作用, 使再现现象质量大为改善. 即使在激光场的质量很差的情况下, 也能得到分辨率好于 6 条/毫米的再现现象.



(a) 无位相复共轭反射波补偿时
物波的再现现象

(b) 有位相复共轭反射波补偿时
物波的再现现象

(c) 介质盒处物的衍射象

图 4

在光束 A_4 的光路上放置严重畸变介质(一块有很多缺陷的有机玻璃), 拍摄 0.3 毫米方孔网格物的再现现象. 当物置于图 2 中 a 处时的再现现象为图 5(a), 物置于 b 处的再现现象为图 5(b), 物在介质盒处的象为图 5(c). 由图 5(c) 可以看出, 由于畸变介质的存在, 使物场变成一片混乱的光场. 在图 5(a) 看不出原始物的象, 但经位相复共轭补偿后, 在图 5(b) 示出较为清晰的网格物再现现象[由于畸变介质不单是位相畸变还有振幅畸变, 所以分辨率不如图 4(b)], 这表明, 由于畸变介质存在使物波的再现现象几近完全消失, 但由于位相复共轭反射波对波面的严格修正, 又使物的真实像再现出来, 恢复了原始物波所携带的信息.

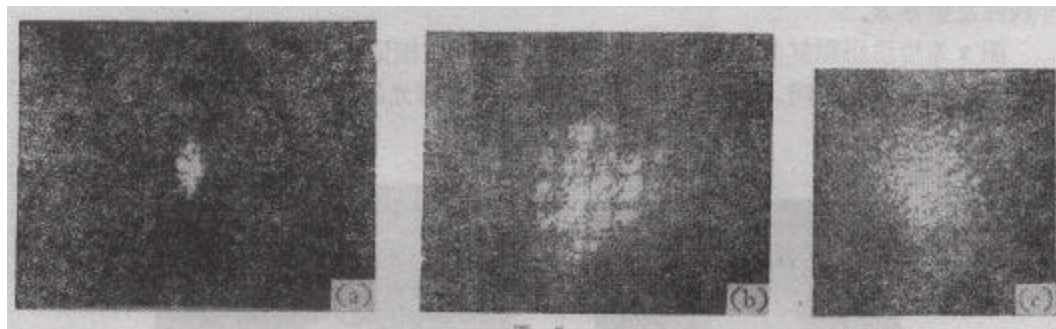


图 5

我们测量了非线性介质叶绿素 A 甲醇溶液的位相复共轭后向反射波的强度. 保持 I_1 不变(能量 ~ 8 毫焦耳) 改变 I_4 , 测量 I_3 . 测量得到的物波强度与后向反射波强度的线性关系如图 6 所示. 由此曲线可以求得 $I_3/I_4 \sim 22\%$. 在介质长度为 5 毫米情况下, 这是所报道的最高转换效率.

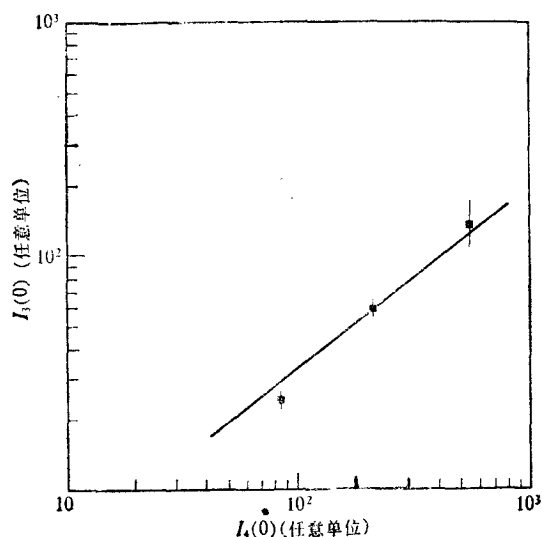


图6 叶绿素A甲醇溶液非线性反射率
(泵浦能量~8毫焦耳, 介质长度5毫米)

讨 论

对于有机大分子,它有复杂的振转能级结构。它的简正振动模非常多,分子的转动惯量大。因而其高能态是准连续态,所以它们有几乎是连续的吸收谱,用这种介质作四波混频很容易实现近共振泵浦。这种近共振吸收介质的克尔非线性要比透明介质 CS_2 强。在相同实验条件下,我们测量得到若丹明 6G 酒精溶液四波混频反射波强度要比 CS_2 强近 1.6 倍,而叶绿素 A 甲醇溶液要比 CS_2 强 3.5 倍。另外,这种有机分子的上能级有很短的生命,因此它具有快响应特性。这些特点,在用四波混频进行信息处理和瞬时储存中都有实际意义。

在我们的实验条件下, $I_1 \cong 1.2 \times 10^8$ 瓦/厘米², 使用的波长为 5320 埃, 介质长度 $L = 5$ 毫米。测量得到非线性反射率为 $R \cong 0.22$, 介质折射率为 $n \cong 1.5$ 。将这些数据代入 (5) 式和 (6) 式,求得 $|\chi^{(3)}| \cong 3.8 \times 10^{-12}$ 静电单位。已知 CS_2 溶液的 $\chi^{(3)} \sim 2 \times 10^{-12}$ 静电单位,因此由四波混频反射波强度的相对测量,叶绿素 A 甲醇溶液的 $|\chi^{(3)}| \sim 3.7 \times 10^{-12}$ 静电单位。由相对测量和绝对测量所得到的结果很接近。这表明用简并的四波混频技术可以方便地测量介质的非线性折射率。

叶绿素 A 是上海植物生理研究所研制。林文青同志测量了激光能量,在此致谢。

参 考 文 献

- [1] E. E. Bergman, I. J. Bigio, B. J. Feldman and R. A. Fisher, *Opt. Lett.*, **3**(1978), 82.
- [2] V. Wang, *Opt. Engineering*, **17**(1978), 267.
- [3] A. Yariv, *IEEE J. Quantum Electronics*, **QE-14**(1978), 650.
- [4] R. M. Hellwarth, *J. Opt. Soc. Amer.*, **67**(1977), 1.

- [5] D. M. Bloom and G. C. Bjorklund, *Appl. Phys. Lett.*, **31**(1977), 592.
- [6] A. Yariv and D. M. Pepper, *Opt. Lett.*, **1**(1977), 16.
- [7] D. M. Bloom, P. F. Liao and N. P. Economou, *Opt. Lett.*, **2**(1978), 58.
- [8] P. F. Liao, D. M. Bloom and N. P. Economou, *Appl. Phys. Lett.*, **32**(1978), 813.
- [9] P. F. Liao and D. M. Bloom, *Opt. Lett.*, **3**(1978), 4.
- [10] 吴存恺、杨天龙、舒海珍、王志英, 激光, 1979年3月.
- [11] 吴存恺、杨天龙、舒海珍、王志英, 在有机染料溶液中简并的四波混频和位相复共轭, 待发表.

GENERATION OF PHASE CONJUGATED BACKWARD WAVE BY DEGENERATE FOUR-WAVE MIXING IN CHLOROPHYLL SOLUTION

WU CUN-KAI FAN JUN-YIN WANG ZHI-YING

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

ABSTRACT

In this paper, the first experiment of generating the phase conjugated backward wave by degenerate four-wave mixing in chlorophyll solution is reported. It is demonstrated that the efficiency converting the incident object beam into the phase conjugated backward wave with interaction length 5 mm long has approached 22%. This is a four-level system having a high conversion efficiency. The intensity of the complex conjugate reflected wave is proportional to that of the incident object wave as we kept the pumping beam intensity constant. The phase conjugate behaviours of the backward wave have been demonstrated. By using the phase conjugate nature of the reflected wave, good quality reconstructed images of a grid are obtained through a phase distorting media.