

# 四波混频反射波产生的原理

吴存恺 杨天龙 舒海珍 王志英

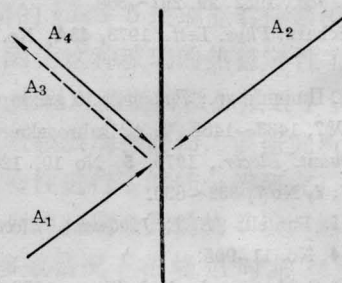
(中国科学院上海光机所)

在文献[1]中,我们报导了有机染料溶液为介质的简并的四波混频作用。这种简并的四波混频过程的提出是基于介质的非线性作用。若作用在非线性介质上有四个光场,其复振幅分别为  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  和  $A_4$ , 相应的频率为  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$  和  $\omega_4$ , 传播矢量为  $\mathbf{k}_1$ 、 $\mathbf{k}_2$ 、 $\mathbf{k}_3$  和  $\mathbf{k}_4$ , 那么由于这种四波混频作用所得到的非线性极化强度可表示为

$$\begin{aligned} & p^{NL}(\omega_4 = \omega_1 + \omega_2 - \omega_3) \\ &= \frac{1}{2} x^{(3)} A_1 A_2 A_3^* \exp\{i[\omega_4 t \\ & \quad - (\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_3) \cdot \mathbf{r}]\} \\ & p^{NL}(\omega_3 = \omega_1 + \omega_2 - \omega_4) \\ &= \frac{1}{2} x^{(3)} A_1 A_2 A_4^* \exp\{i[\omega_3 t \\ & \quad - (\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_4) \cdot \mathbf{r}]\} \end{aligned}$$

假如照射非线性介质的波  $A_1$  和  $A_2$  有  $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ , 并且它们沿相反方向传播, 即  $\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 = 0$ , 那么当用  $A_4$  波照射时, 如果  $\omega_4 = \omega$ , 则得到  $A_3$  波,  $A_3$  波的频率  $\omega_3$  也等于  $\omega$ , 并且  $\mathbf{k}_3 = -\mathbf{k}_4$ , 即  $A_3$  波是  $A_4$  的后向反射波。由上面的公式可以看出  $A_3 \propto A_4^*$ , 即  $A_3$  波是  $A_4$  波的位相复共轭。Yariv 最近指出<sup>[2]</sup>, 这种简并的四波混频过程可与实时全息照相类比。  $A_4$  为物波,  $A_1$  为参考波,  $A_2$  是再现波,  $A_3$  是所得到的再现物波。然而, Yariv 及其他作者<sup>[3~5]</sup> 强调这种简并的四波混频过程是一种非线性作用。我们用有机染料溶液(若丹明 6G, 若丹明 B 酒精溶液)为介质所做的实验表明, 这种四波混频过程是实时全息照相过程。其产生的机制是由于光束  $A_1$  和  $A_4$  在

介质中相干涉从而产生强度的空间调制。这种强度的空间变化引起被共振激发的介质的基态和激发态粒子数分布产生空间变化, 从而引起折射系数及吸收系数的空间变化。这样在介质中形成一个体光栅, 这个体光栅就是物波  $A_4$  的全息照相记录。因此当用光束  $A_2$  再现时, 就得到原始物波的再现波。按照全息照相原理, 在我们的情况下, 这个再现的物波  $A_3$  比例于原始物波的复共轭  $A_4^*$ 。



全息照片

图1 实时全息照相类比

我们的实验装置如图 2 所示。当没有染料盒 II 时, 由取样板可以取出简并的四波混频过程所产生的反射波  $A_3$ <sup>[1]</sup>, 这时满足能量守恒和动量守恒条件。然而, 从实时全息照相的角度来看, 就不应当受这个条件的限制, 我们的实验证明了这点。当将染料盒 II 插入图 2 所示位置时, 我们立刻看到原来的绿色(5320 埃)反射波  $A_3$  消失, 而出现强的黄色反射波  $A_3'$ 。反射波  $A_3'$  的谱线宽度约为 100 埃, 中心波长为 5600 埃。这个强的反

收稿日期: 1978 年 10 月 11 日。

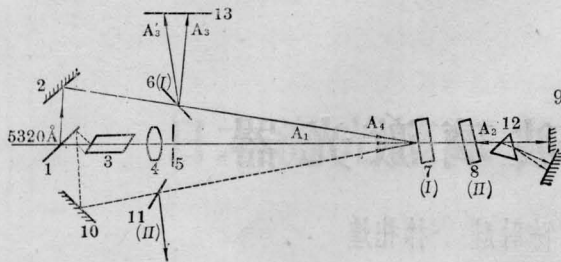


图2 四波混频作用的实验装置

1—分束器；2、9、10—全反射镜；3—光程补偿器；4—长焦距透镜，5—光闸，6—取样板(I)，7—染料盒(I)，8—染料盒(II)，11—取样板(II)，12—色散棱镜，13—观察屏

射波的产生是由于反射放大作用。染料盒 II 的自发辐射荧光经反射镜 9 反射被染料盒 II 及染料盒 I 行波放大。染料盒 I 在光束  $A_1$  和  $A_4$  作用下，形成一个体全息光栅，并且这个体全息光栅是有增益的。虽然再现光束黄光和绿光沿着相同方向传播，但由于它们的波长不同，故经体光栅后所得到的再现物波  $A'_3$  和  $A_3$  应有一定的夹角。在我们的实验中， $A_1$  和  $A_4$  光束的夹角为  $6.2 \times 10^{-2}$  弧度，按照体光栅公式

$$2d \sin \theta = \lambda$$

可以求出这两束光在染料盒 I 中产生的体光栅常数为  $d \approx 8.6$  微米。在我们的实验装置中，取样板(I)6 与染料盒(I)7 的距离为 1005 毫米，观察屏 13 与 6 的距离为 160 毫米。当染料盒 II 插入时，反射波  $A'_3$  (黄光) 与反射波  $A_3$  (绿光) 在观察屏上的位移为 2 毫米。因此  $\theta' - \theta \approx 1.7 \times 10^{-3}$ 。中心波长为 5600 埃的黄光经这个体光栅衍射，由布喇格条件决定其衍射角与绿光 5320 埃不同。由测量的衍射角之差  $\theta' - \theta$  可推算出体光栅常数  $d \approx 8.7$  微米。这与上面的结果一致。上面的实验结果证明了这种四波混频过程是实时全息照相过程。另外，如果用一色散棱镜 12 置于图 2 的位置，则当两个染料盒都存在时，调节全反射镜 9 的角度，使绿光或黄光沿着  $A_1$  光的反方向传播，那么在观察屏上可以观察到反射波  $A_3$  或  $A'_3$ 。其位置不受染料盒

II 的位置和转角的影响。

我们用 1 米平面反射光栅摄谱仪拍摄了各个波的光谱，其结果在图 3 中给出。图中第一行和第二行是汞光谱；第二、第四行是参考光波；第五行是物波；第六行是再现光波  $A_2$ ；第七行、第八行是反射波  $A_3$ ；第九、第十行是反射波  $A'_3$  (插入染料盒 II 后)；第十一行是染料的超荧光辐射；第十二行是汞光谱。从图可以看到，当没有染料盒 II 时，四个波的频率完全一样，这是简并的四波混频过程，即用记录的光波频率再现。当第二个染料盒 II 插入时，其反射波变宽，中心波长移向长波方向，即用黄光再现。

根据全息照相原理，记录介质应当能同时记录以各种角度入射的物波。我们从主光束中分出了另一路光(在图中用虚线表示)同时照射到染料盒 I 上。由取样板 II 也观察到了反射波  $A_3$  和  $A'_3$ 。这就进一步证实了我们的看法。

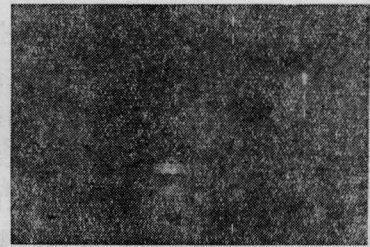


图3 四波混频过程各个波的光谱

我们用透明液体，如  $CS_2$ 、酒精、水等做介质也观察到了简并的四波混频反射波。但其强度要比有机染料酒精溶液弱得多。对于  $CS_2$ ，其反射波的强度要比有机染料酒精溶液低约二倍左右，而且有较强的散射背底。我们还发现有后向受激散射过程。对于酒精溶液其反射波要比  $CS_2$  低近一个数量级，但没有散射背底。对于水，其反射波更弱。

另外，我们还观察到  $Nd^{3+}$  玻璃、 $CaF_2$ 、 $Dy^{2+}$  晶体作介质的简并的四波混频反射波。

(下转第 9 页)

成功,前一种情形还未见实验报导。估计是因为波长变短时要求电子束电流密度和泵浦波强度更高,入射与反射光波在同一轴线上不易区分,光学谐振腔不易配置等困难造成的。我们相信,随着强电子源与强光源的发展以及理论的进一步深化,这方面的实验是会成功的。

### 参 考 文 献

- [1] H. Motz; *J. Appl. Phys.*, 1951, **22**, No. 5, 527; 1953, **24**, No. 7, 826.
- [2] V. L. Granatstein *et al.*; *IEEE, Trans. Microwave Theory Tech.* 1974, **MTT-22**, 1000.
- [3] D. A. G. Deacon; *Phys. Rev. Lett.*, 1977, **38**, No. 6, 892.
- [4] K. Landecker; *Phys. Rev.*, 1952, **86**, No. 6, 852.
- [5] V. L. Granatstein *et al.*; *Phys. Rev.*, 1976, **A14**, 1194~1201.
- [6] J. M. Buzzi *et al.*; *IEEE, Trans. Microwave Theory Tech.*, 1977, **MTT-25**, No. 6, 559~560.
- [7] P. L. Kapitza, P. A. M. Dirac; *Proc. Camb. Phil. Soc.*, 1932, **29**, 297~300.
- [8] H. Scharz; *Phys. Lett.*, 1973, **43A**, No. 5, 457~458.
- [9] Б. Р. Цикин и др.; *Радиотех. и электрон.*, 1972, **17**, №7, 1433~1438. V. A. Dubrovskii *et al.*; *Sov. J. Quant. Electr.*, 1975, **5**, No 10, 1248~1253; 1977, **7**, No 7, 832~836.
- [10] R. H. Pantell; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1968, **QE-4**, No. 11, 905.
- [11] V. P. Sukhatme; *J. Appl. Phys.*, 1973, **44** No. 5, 2331.

(上接第 11 页)

因为这两种介质对 5320 埃的激光有较小的吸收系数,因此不能被有效地共振激发。但肉眼仍能可见共轭反射波。

由以上的讨论,我们可以得出如下结论:为了获得简并的四波混频反射波,可以选用两种类型介质。一种是透明介质,其混频作用是利用介质的非线性特性,因此,克尔非线性大的介质,反射波也强。另一种介质是能被共振激发的介质,这种四波混频作用是实时全息照相过程。因此共振吸收越强,反射波也越强。后一种过程是一种广义的四波混

- [12] V. P. Sukhatme *et al.*; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1974, **QE-10**, No. 12, 870.
- [13] M. J. Madey; *J. Appl. Phys.*, 1971, **42**, No. 5, 906.
- [14] L. R. Elias; *Phys. Rev. Lett.*, 1976, **36**, No. 13, 717.
- [15] J. P. Blewett; *J. Appl. Phys.*, 1977, **48**, No. 7, 2692~2698.
- [16] V. L. Granatstein *et al.*; *Appl. Lett.*, 1977, **30**, No. 8, 384.
- [17] T. C. Marshall *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **31**, No. 5, 320~322.
- [18] V. L. Granatstein *et al.*; *IEEE, Trans. Microwave Theory Tech.*, 1977, **MTT-25**, No. 6, 545.
- [19] D. Marcuse; *Bell. System Technical. J.*; 1962, **41**, No. 5, 1557~1571.
- [20] F. Winterberg; *JOSA*, 1976, **66**, No. 9, 966~968.
- [21] J. V. Jelly; *Cerenkov Radiation and its Application*, 1958.
- [22] J. E. Walsh *et al.*; *The Physics of Fluids*, 1977, **20**, No. 4, 709~710.
- [23] A. Govtr, A. Yariv; *Physics of Quantum Electronics*, 1978.
- [24] S. Schneider, R. Spitzer; *Nature*, 1974, **250**, No. 5468, 630~645. *IEEE, Trans. Microwave Theory Tech.*, 1977, **MTT-25**, No. 6, 551~556.
- [25] H. Dekker; *Physics Lett.*, 1976, **59A**, No. 5, 369~370.
- [26] F. A. Hopf *et al.*; *Opt. Commun.*, 1976, **13**, 413. *Phys. Rev. Lett.*, 1976, **37**, No. 20, 1342~1345. Abawi *et al.*; *Phys. Rev.*, 1977, **A16**, No. 2, 666~671. A. Hasegawa *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1976, **29**, No. 9, 542~544. T. Kwan *et al.*; *Phys. Fluids*, 1977, **20**, No. 4, 581.
- [27] W. B. Colson; *Phys. Lett.*, 1976, **59A**, No. 3, 187.

频过程。用这种方法可以获得更强的反射波。这就为利用四波混频作用进行信息处理和信息储存开辟了更为广阔的前景。

### 参 考 文 献

- [1] 吴存恺,杨天龙,舒海珍,王志英;《激光》,1979, **6**, No3, 12.
- [2] A. Yariv; *Opt. Commun.*, 1978, **25**, 23.
- [3] R. M. Hellwarth; *JOSA*, 1977, **67**, 1.
- [4] D. M. Floom, G. C. Bjorlund; *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **31**, 592.
- [5] S. M. Jensen, R. W. Hellwarth; *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **32**, 3.