

# 瞬态简并四波混频中的弛豫效应

兰 光 范滇元

(中国科学院上海光机所)

**摘要:** 引入唯像弛豫方程组描述介质中的光栅建立和衰变过程。在理论和实验上研究了介质弛豫对四波混频瞬态特性的影响,通过考察后向波波形的变化,观察到光栅的“积累效应”和“光滑效应”。实验结果得到满意的理论解释。

## Relaxation in transient degenerate four-wave mixing

Lan Guang, Fan Dianyuan

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

**Abstract:** A series of phenomenological relaxation equations have been introduced to describe the formation and decay of grating in the medium. The influences of medium relaxation on the transient properties of degenerate four-wave mixing were studied theoretically and experimentally. Through investigation of the shape of backward wave, the collection effect and smoothing effect were observed. Theoretical explanations of the experimental results were perfect.

### 一、引 言

介质弛豫是普遍存在的一种物理机制,对许多非线性过程都有一定影响。在四波混频的研究中,多数工作着重讨论的是稳态情况(连续光入射)或位相复共轭特性,介质的弛豫效应并没有显现直接的影响。然而,当我们研究瞬态四波混频时,弛豫是一个不可忽视的重要因素。在实验上已观察到弛豫对后向波脉冲波形有显著影响<sup>[1]</sup>。

这里我们将从理论上和实验上详细地研

究瞬态四波混频过程中介质弛豫的作用。在理论上分析了与混频过程相关的光栅项,并引入一组弛豫方程来描述光栅的建立和衰变,再和耦合波方程组联立,便可以完整地研究包含弛豫效应的瞬态四波混频的各种特性。在实验上,我们用近矩形的激光脉冲作为入射波,通过考察后向波脉冲波形的变化来研究弛豫的作用。我们观察到介质弛豫所造成的光栅“积累”与“光滑”这两个物理效应。

收稿日期:1986年10月6日。

## 二、包含弛豫效应的瞬态耦合波方程组

考虑图1所示的瞬态简并四波混频(DFWM)过程。在这里,相互作用的四个波都是时间上有限的脉冲,而且脉冲宽度可以和介质的弛豫时间相比。在 $\theta \ll 1$ 、幅变振幅、非抽空(Non-depletion)以及脉冲空间长度远大于介质长度的近似条件下,若不计及介质的弛豫,则可得到下列简化的耦合波方程组:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dA_3}{dz} &= -\alpha A_3 + \frac{27}{4} i\mu\omega v \chi_{1111}^{(3)} A_1 A_2 A_4^* \\ \frac{dA_4}{dz} &= \alpha A_4 - \frac{27}{4} i\mu\omega v \chi_{1111}^{(3)} A_1 A_2 A_3^* \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 $A_1, A_2, A_3, A_4$ 分别是 $E_1, E_2, E_3, E_4$ 的慢变复振幅,并且都是时间的函数; $\alpha$ 是线性吸收系数; $v$ 是介质中的光速。在非抽空条件下, $A_1, A_2$ 近似保持原始值不变。

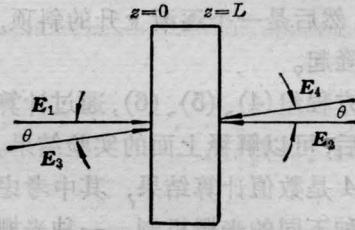


图 1

在物理上可以把DFWM看成是一个实时全息过程,介质中光栅(即折射率调制)的形成和变化起着重要的作用。从图1可以看出,四波相互作用涉及到多组光栅,它们是: $E_1$ 与 $E_4$ 、 $E_2$ 与 $E_4$ 、 $E_1$ 与 $E_3$ 、 $E_2$ 与 $E_3$ 及 $E_1$ 与 $E_2$ 形成的五种光栅。在此基础上,我们定义了五个对应的光栅项:

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta N_1 &= BA_1 \cdot A_3^* \\ \Delta N_2 &= BA_2 \cdot A_3^* \\ \Delta N_3 &= BA_1 \cdot A_4^* \\ \Delta N_4 &= BA_2 \cdot A_4^* \\ \Delta N_5 &= BA_1 \cdot A_2 \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中 $B = \frac{27}{4} \mu\omega v \chi_{1111}^{(3)}$ ;  $\chi_{1111}^{(3)}$ 是三阶极化张量的一个分量。由于介质存在弛豫,光栅不会瞬时建立,也不会瞬时消失。为此,我们引入一组唯像的弛豫方程组来描述光栅的建立和衰变过程。

$$\left\{ \begin{aligned} \tau \frac{d(\Delta N_1)}{dt} + \Delta N_1 &= B(A_1 A_3^*) \\ \tau \frac{d(\Delta N_2)}{dt} + \Delta N_2 &= B(A_2 A_3^*) \\ \tau \frac{d(\Delta N_3)}{dt} + \Delta N_3 &= B(A_1 A_4^*) \\ \tau \frac{d(\Delta N_4)}{dt} + \Delta N_4 &= B(A_2 A_4^*) \\ \tau \frac{d(\Delta N_5)}{dt} + \Delta N_5 &= B(A_1 A_2) \end{aligned} \right. \quad (3)$$

式中 $\tau$ 是弛豫时间。此时,耦合方程组(1)修改为:

$$\begin{aligned} \frac{dA_3}{dz} &= -\alpha A_3 + i[\Delta N_3 \cdot A_2 + \Delta N_4 \cdot A_1 \\ &\quad + \Delta N_5 \cdot A_4^*] / 3 \\ \frac{dA_4}{dz} &= \alpha A_4 - i[\Delta N_1 \cdot A_2 + \Delta N_2 \cdot A_1 \\ &\quad + \Delta N_5 \cdot A_3^*] / 3 \end{aligned} \quad (4)$$

方程组(3)和(4)就是包含弛豫效应的瞬态耦合波方程组。

考虑到同一种介质中可以同时存在多种折射率调制的机制,上述光栅项和弛豫方程组需作推广。若存在 $k$ 种不同弛豫时间的光栅机制,则有:

$$\Delta N_i = \sum_{j=1}^k (\Delta N_i)_j, \quad i=1, 2, 3, 4, 5 \quad (5)$$

$$\text{及} \left\{ \begin{aligned} \tau_j \frac{d(\Delta N_1)_j}{dt} + (\Delta N_1)_j &= B_j(A_1 \cdot A_3^*) \\ \tau_j \frac{d(\Delta N_2)_j}{dt} + (\Delta N_2)_j &= B_j(A_2 \cdot A_3^*) \\ \tau_j \frac{d(\Delta N_3)_j}{dt} + (\Delta N_3)_j &= B_j(A_1 \cdot A_4^*) \\ \tau_j \frac{d(\Delta N_4)_j}{dt} + (\Delta N_4)_j &= B_j(A_2 \cdot A_4^*) \\ \tau_j \frac{d(\Delta N_5)_j}{dt} + (\Delta N_5)_j &= B_j(A_1 \cdot A_2) \end{aligned} \right. \quad (6)$$

式中  $j=1, 2, \dots, k$ ;  $B_j$  是不同光栅机制时的值, 由于不同机制的  $\chi_{ij}^{(3)}$  不同, 所以  $B$  也不一样;  $\tau_j$  是各不同光栅机制的弛豫时间。上面的方程组(4)和(6)及(5)式可以用来研究包括弛豫的简并四波混频问题。

### 三、光栅的“积累”效应

由于介质的弛豫, 使得光栅的形成有一个建立的过程。在此过程中, 前一时刻光波激发的光栅对后一时刻激发的光栅有一定的贡献, 光栅的强度(折射率调制的程度)会随时间而积累, 就象氙灯泵浦工作物质时, 亚稳态粒子数会逐渐积累一样。它的直接表现是后向波的时间波形显著不同于入射波。为了清楚地观察这一效应, 我们用陡前后沿的平顶矩形波作为入射波, 此时, 后向波波形的变化将明显地反映弛豫的影响。实验装置如图2所示。由 Nd:YAG 振荡器输出的调 Q 脉冲, 脉宽约为 60 ns。经一级 Nd:YAG 放大后, 能量约为 3 mJ, 且为垂直偏振光。实验中用的是 CS<sub>2</sub> 介质, 其主要的栅机制是分子取向光栅, 弛豫时间为 10<sup>-12</sup> s 量级, 其它还有热光栅等, 染料盒的有效厚度是 5 mm。BS<sub>1</sub>、BS<sub>2</sub> 和 BS<sub>3</sub> 是分束镜, 它们对 1.06 μm 光的反射率分别为 43%、50% 和 95%。图中的 L<sub>1</sub> 是 M<sub>2</sub> 到染料盒的距离; L<sub>2</sub> 是 BS<sub>2</sub> 到 BS<sub>3</sub> 的距离, 在实验中 L<sub>2</sub> = 10 cm。D<sub>1</sub>、D<sub>2</sub> 分别是 PIN 管和强流管, 用于探测入射波和后向波的波形。

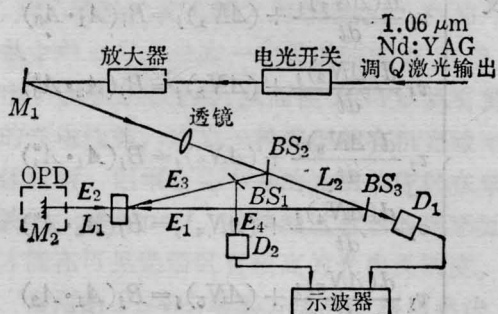


图2 实验装置图

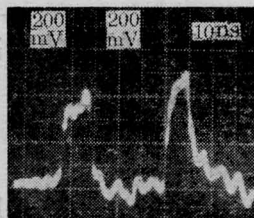


图3

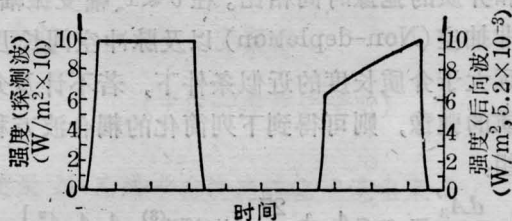


图4

输入波形: 梯形; 脉冲宽度:  $\tau_0=10$  ns; 脉冲空间长度=100 倍介质长度; 线性吸收系数  $\alpha=0$ ;  
弱耦合近似  $|K|L \ll 1$ ; 其中  $|K|=B \cdot A_1 \cdot A_2$ ,  $L$  是介质的长度

图3是  $L_1=7$  cm 时, 输入脉冲(左边)和后向波脉冲(右边)的照片。可以看到后向波的波形明显不同于入射波, 它的前沿起始部分较陡, 然后是一个逐渐上升的斜顶, 后沿下方有一隆起。

由方程组(4)、(5)、(6), 通过计算机进行数值解后, 可以解释上面的实验结果。

图4是数值计算结果, 其中考虑了同时存在两种不同的光栅机制, 一种光栅机制的弛豫时间  $\tau_1=10^{-12}$  s, 另一种为  $\tau_2=10^{-8}$  s;  $B_2/B_1=0.5$ 。

由图4可以看到, 由于同时存在两种不同弛豫光栅, 并且贡献的大小不同, 使后向波确实如图3的实验结果那样, 有比较陡的前后沿和一个上升的斜顶。这说明首先是快弛豫机制的贡献占主要地位, 然后另一种长时间弛豫机制逐渐起作用。从这个结果, 我们可以推断 CS<sub>2</sub> 的主要光栅机制是分子取向光栅。

如果我们把  $E_2$  作一定的延时, 则可以判断光栅机制贡献的大小, 并且可以由此推算出它们的弛豫时间量级。图5是在图2的实

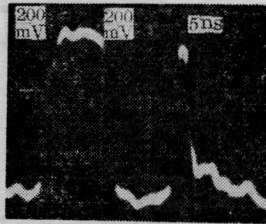


图 5

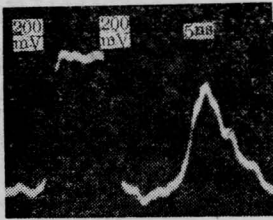


图 6

验装置中,将 $E_2$ 相对 $E_1$ 的延时调至9 ns后得到的,图中右边的尖脉冲是由分子取向光栅产生的,而它后面的隆起则是由长时间弛豫机制造成的,它们间有一明显的阶跃,由此阶跃的大小可以得出不同光栅机制的贡献比。 $CS_2$ 的分子取向光栅的贡献约占80%,长时

间弛豫机制则占约20%。同时也能估算它们的弛豫时间量级。

图6是用共振吸收的BDN作介质的情况,其它的条件和图5的相同。可以看到,此时后向波的上升和下降沿都很慢,由此推知,这时主要有一种光栅机制起作用,其弛豫时间的大小和入射光的脉宽相当,为 $10^{-8}$ 秒量级。

另外,我们用有周期调制的脉冲入射,得到的后向波调制并没有因四波混频的三波相乘而加强,这也是由于光栅的弛豫所致,我们也可以从前面的理论给出较好的解释。

感谢上海光机所301组的同志在各方面给予的帮助。

### 参 考 文 献

- 1 Lan G, Zhao S *et al.* Paper in the First International Laser Science Conference(1985), Dalias USA

## $Al_2O_3:Ti^{3+}$ 获得宽调谐激光输出

掺钛宝石是最近发展起来的新型终端声子可调谐激光晶体。由于它具有调谐范围宽、增益高、阈值低、性能稳定和可以多种形式泵浦等优点,克服了红到近红外区染料、色心和半导体激光介质的某些缺点,如稳定性、分段调谐等,在激光光谱学、激光化学、以及军事上和工业上都将有重要的应用前景,受到国内外广泛重视。

我们在几年前就开始对 $Ti^{3+}:Al_2O_3$ 晶体的光谱特性进行了研究,去年开始用提拉法生长这种晶体,最近用YAG倍频激光泵浦实现了它的宽调谐激光运转。

使用的晶体长18 mm。采用 $e$ 光近轴泵浦,棱镜调谐,半共焦腔的工作方式。仅用一对膜片便获得了以677 nm到987 nm的调谐范围。最大输出能量为5 mJ;峰值功率为0.5 MW;近场功率密度高达52 MW/cm<sup>2</sup>;斜率效率为21%;量子效率为34.5%泵浦阈值为8.5 mJ。光束发散角为衍射极限(1.62 mrad),表明激光器以TEM<sub>00</sub>模运转。

(中国科学院安徽光学机所 汤洪高

殷绍唐 吴路生 陈一斌

1987年10月10日收稿)