

二维声光互作用理论及实验分析*

任占祥 董孝义 张建忠 盛秋琴

(南开大学 现代光学研究所)

赵启大 胡泰益

(北京工业大学 应用物理系)

提 要

本文在理论上推导了二维声光互作用的耦合波方程的普遍形式,并借以对正常声光互作用下的喇曼-奈斯(Raman-Nath)型衍射进行了求解,所得结果与两个一维喇曼-奈斯型声光调制器组成的二维器件的实验结果进行比较,两者相符。

关键词: 耦合波方程, 喇曼-奈斯型声光互作用, 二维声光互作用。

一、引 言

1976年Chang等人^[1]利用非线性光学中的参量互作用理论,建立了声光互作用的统一理论。该理论对喇曼-奈斯(Raman-Nath)与布喇格(Bragg)型以及正常与反常声光作用范畴中的一系列现象及其应用都给出了正确解释。但以往的工作都是在一维作用情况下进行的。由于声光作用可以以多维形式实现,即同一光束可以在同一声光介质中同时与来自多个方向的超声波发生作用,从而在多个方向上出现声光衍射效应。二维声光衍射效应就是其中一典型例子。最近的工作表明^[2,3],这种二维声光作用可以用于制作多通道开关、空分复用器件以及空间光调制器等,因此它在光计算、光通信、光信息处理以及光交换等领域中具有广泛的应用前景。

作者研制的二维喇曼-奈斯型声光调制器是光学空间相干度双稳态的关键器件,而光学空间相干度双稳态在相干度量化,图像编码,光计算等方面将全得到重要应用^[4]。

二、二维声光互作用的耦合波方程

设入射光是单色平面波,传播方向与 $x-z$ 平面的夹角为 θ_0 ,与 x 轴的夹角为 θ_1 ,其圆频率为 ω_0 和波矢量为 k_0 ,波矢量 k_0 的模为

$$k_0 = \frac{2\pi n_0}{\lambda_0}, \quad (1)$$

式中 λ_0 为光波在真空中的波长; n_0 为介质对入射光的折射率(一般说来, n_0 与入射光的偏振状态和传播方向有关)。设两束超声波的圆频率和波矢量分别为 ω_{1s} 、 K_{1s} 和 ω_{2s} 、 K_{2s} ,波矢量 K_{1s} 和 K_{2s} 的模分别为:

$$K_{1s} = \frac{2\pi}{\lambda_1} = \frac{2\pi}{v_1} f_1, \quad K_{2s} = \frac{2\pi}{\lambda_2} = \frac{2\pi}{v_2} f_2, \quad (2)$$

收稿日期: 1990年1月10日; 收到修改稿日期: 1990年6月14日

* 国家自然科学基金高技术基金资助的项目。

式中 λ_1 和 λ_2 为超声波的波长; f_1 和 f_2 为超声波的频率; v_1 和 v_2 为声速。不失一般性, 设 \mathbf{K}_1 在 x - y 平面内, 其方向与 x 轴的夹角为 θ_α ; \mathbf{K}_2 在 x - z 平面内, 其方向与 x 轴的夹角为 θ_β , 如图 1 所示。

根据参量互作用原理, 入射光波和解质中超声波相耦合而产生一系列复合频率的极化波, 其圆频率 $\omega_{p,q}$ 和波矢量 $\mathbf{k}_{p,q}$ 分别为

$$\left. \begin{aligned} \omega_{p,q} &= \omega_0 + p\omega_{1s} + q\omega_{2s}, \\ \mathbf{k}_{p,q} &= \mathbf{k}_0 + p\mathbf{K}_{1s} + q\mathbf{K}_{2s}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 $p, q = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。这些极化波转而激发相同频率的光辐射, 即各级衍射光。它们的总电场 $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ 可表示为如下展开式

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \sum_{p,q=-\infty}^{\infty} \mathbf{e}_{p,q} E_{p,q}(x) \exp[i(\omega_{p,q}t - \mathbf{k}_{p,q} \cdot \mathbf{r})], \quad (4)$$

式中 $\mathbf{e}_{p,q}$ 为 (p, q) 衍射级的单位电场矢量。假定超声波为单一频率的平面波, 则可写出相应的声光作用应变张量 $\mathbf{S}(\mathbf{r}, t)$ 和非线性极化矢量 \mathbf{P}^{NL} 。

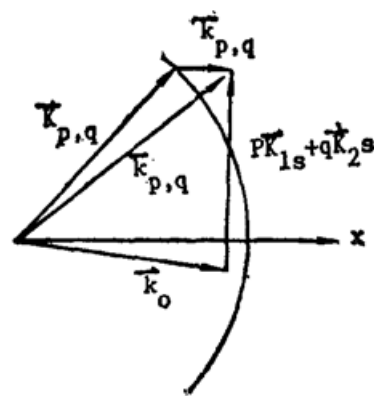


Fig. 2 Illustration of momentum mismatching

由极化波激发的 (p, q) 级衍射光的自由光波矢量 $\mathbf{k}_{p,q}$, 当入射光方向 \mathbf{k}_0 为任意时, $\mathbf{k}'_{p,q}$ 一般不等于 $\mathbf{k}_{p,q}$, 为此引入如图 2 所示的动量失配 $\Delta\mathbf{K}_{p,q} = \mathbf{k}'_{p,q} - \mathbf{k}_{p,q}$ 。此式中 $\Delta\mathbf{K}_{p,q}$ 被限制在沿 x 轴方向上, 因此 $\mathbf{k}_{p,q}$ 的模为 $(n_{p,q}\omega_{p,q}/c)$, 而其方向使 $\Delta\mathbf{K}_{p,q}$ 在沿 x 轴方向上。这样, $\Delta K_{p,q} \doteq [(k'^2_{p,q} - k^2_{p,q})/2k'_{p,q}]$, 令

$$\left. \begin{aligned} x_{1p,q} &= -n^2_{p,q} n^2_{p-1,q} P_1, \\ x_{2p,q} &= -n^2_{p,q} n^2_{p,q} P_2, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中 P_1 和 P_2 为相应方向上的有效声光系数。因 $[dE_{p,q}(x)/dx] \ll k'_{p,q}E_{p,q}$, 在参量互作用方程^[5]中忽略了 $[d^2E_{p,q}(x)/dx^2]$ 项, 并考虑上述条件得:

$$\begin{aligned} \frac{dE_{p,q}(x)}{dx} - i\Delta K_{p,q}E_{p,q}(x) &= \frac{k^2_{p,q}}{4k'_{p,q}} [n^2_{p+1,q}P_1S_1E_{p+1,q}(x) - n^2_{p-1,q}P_1S_1E_{p-1,q}(x) \\ &+ n^2_{p,q+1}P_2S_2E_{p,q+1}(x) - n^2_{p,q-1}P_2S_2E_{p,q-1}(x)], \end{aligned} \quad (6)$$

此式即为二维声光互作用的耦合波方程。这样, 可以作如下结论:

(1) 声光互作用长度 L 很小时, 各级衍射光因动量失配而导致的光强减弱并不明显, 因此可得到多级次的衍射光, 即喇曼-奈斯衍射。

(2) 声光互作用长度 L 很大时, 一切 $\Delta K_{p,q} \neq 0$ 的衍射光均很弱。入射光形成的零级光不能和最相邻的四个级次以外的光相耦合, 因此仅当调整入射光方向使 $\Delta\mathbf{K}(\pm 1, 0)$ 和 $\Delta\mathbf{K}(0, \pm 1)$ 四个中某一个等于零时, 才能得到很强的该级衍射光, 即布喇格衍射。可以看出, 二维布喇格衍射与一维布喇格衍射的结果是一样的, 即只能得到包括 $(0, 0)$ 级在内的某两级衍射光。

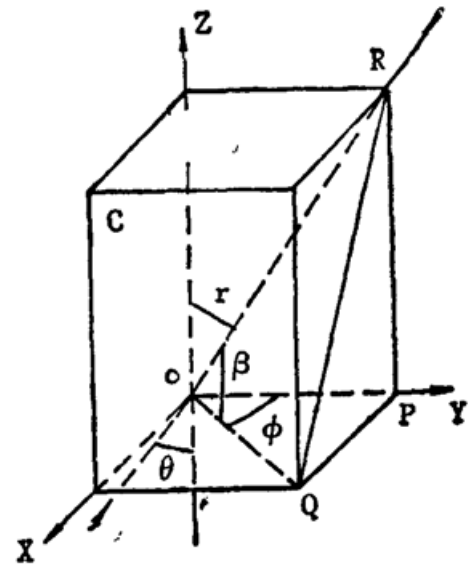


Fig. 1 Schematic diagram of acousto-optic interaction

三、喇曼-奈斯衍射的耦合波方程解

在正常声光作用下, $\Delta n = -n^3 PS/2$, $e_{p,q}$ 均同向, $n_{p,q} = n_0$ 。一般 $\theta_\alpha = \theta_\beta = (\pi/2)$, 定义

$$\xi_1 = -\frac{2\pi \Delta n_1 L}{\lambda_0 \cos \theta_1}, \quad \xi_2 = -\frac{2\pi \Delta n_0 L}{\lambda_0 \cos \theta_1}, \quad (7)$$

ξ_1 和 ξ_2 分别表示由 K_{1s} 和 K_{2s} 的声光相互作用导起的相移。这样, 考虑到 p, q 取值的任意性与独立性, 利用贝塞尔函数的递推关系可由式(6)解得垂直入射时的喇曼-奈斯衍射的各级衍射光效率为

$$\eta_{p,q} = J_p^2(\xi_1) J_q^2(\xi_2). \quad (8)$$

由超声功率 $P_s = \frac{1}{2} \rho v^2 |S|^2 HL$, 其中 ρ 为解质密度, v 为声速, S 为应变, H 为换能器宽度, 进一步得到衍射效率与超声功率的关系

$$\eta_{p,q} = J_p^2(M_1 \sqrt{P_{s1}}) J_q^2(M_2 \sqrt{P_{s2}}), \quad (9)$$

式中 M_1, M_2 是一个与声光调制器有关的参数。

四、实验内容和结果

实验中使用的器件是自己研制的二维喇曼-奈斯型声光调制器件, 它是由两个声场方向相互垂直的一维喇曼-奈斯型声光调制器粘合而成的。晶体材料为 PbMoO_4 , 声场频率 $f_{1s} = 26 \text{ MHz}$, $f_{2s} = 28 \text{ MHz}$, 入射光波 $\lambda_0 = 6328 \text{ \AA}$ 。实验装置示意如图 3 所示。

实验测定了几种情况下的各级衍射效率, 结果列于表 1 中。根据实验结果, 在计算机上绘出了与实验上对应的空间分布衍射图, 如图 4 所示, 图中峰高表示相对光强。

从(8)式计算可知, 实验与理论很好地符合, 至于衍射效率与理论值有微小出入, 这是由于此种结构的器件衍射效率 η 不同所致。该结构的器件衍射效率为

$$\eta_p = J_p^2 \left[\xi_1 \frac{\sin\left(\frac{1}{2} \alpha_0 \theta_1\right)}{\frac{1}{2} \alpha_0 \theta_1} \right], \quad \eta_q = J_q^2 \left[\xi_2 \frac{\sin\left(\frac{1}{2} \alpha_p \theta_2\right)}{\frac{1}{2} \alpha_p \theta_2} \right], \quad (10)$$

这里已假定首先入射到 $\xi = \xi_1$ 的器件上。由于从第一个声光器件出射的衍射光入射到第二个器件时均非垂直入射, 其入射角随级次 P 的不同而不同。垂直 $y-z$ 平面入射时, 即 $\alpha_0 = 0$, 衍射效率为:

$$\eta_{p,q} = J_p^2[\xi_1] J_q^2 \left[\xi_2 \frac{\sin\left(\frac{1}{2} \alpha_p \theta_2\right)}{\frac{1}{2} \alpha_p \theta_2} \right], \quad (11)$$

注意到 $[\sin(\alpha_p \theta_2/2)/(\alpha_p \theta_2/2)] \ll 1$, 故 $\eta_{p,q}$ 随 P_{s2} 变化趋缓, 并且缓慢程度随第一个声光调制器出射的衍射级次不同而不同。

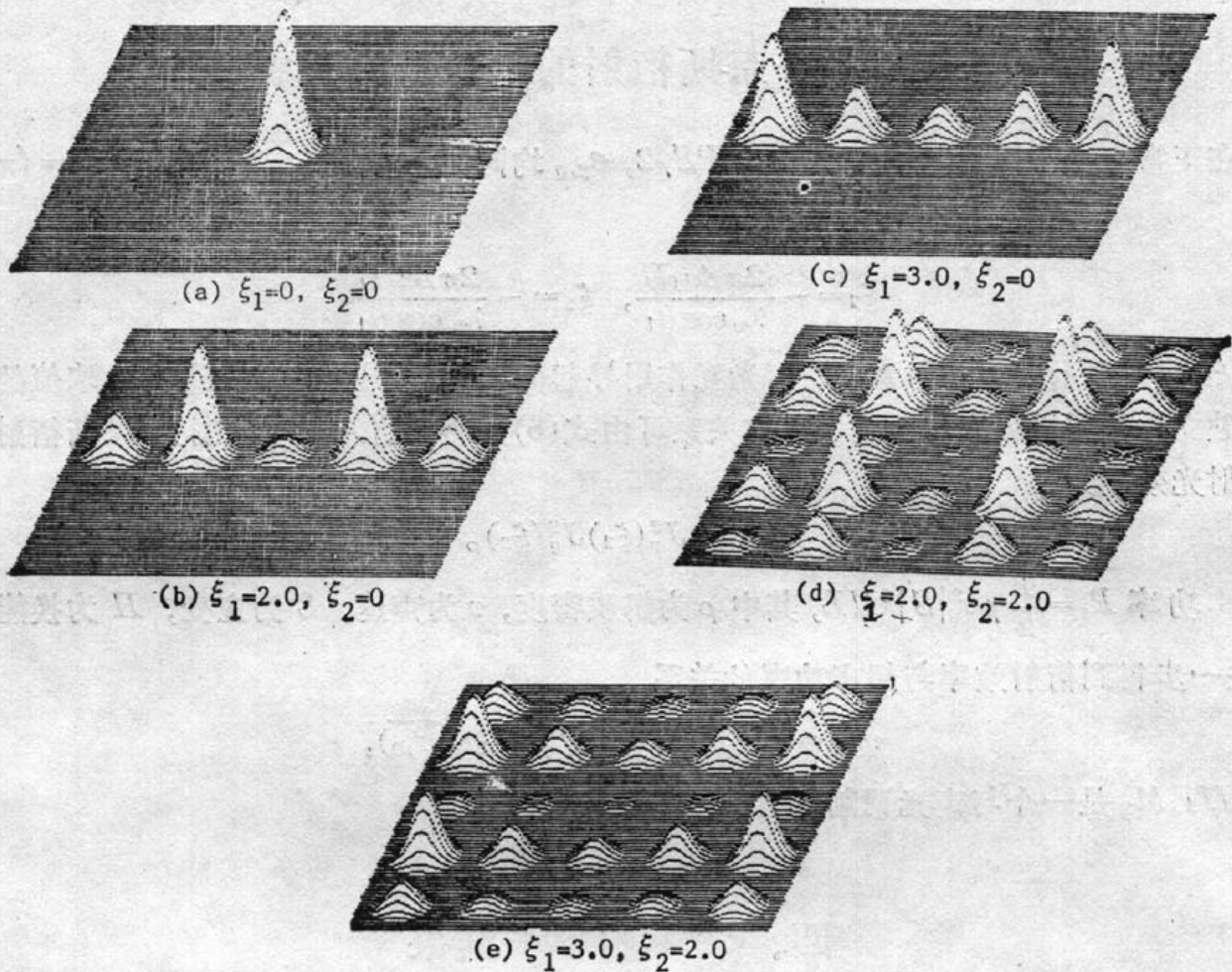


Fig. 3 Acousto-Optic diffraction patterns

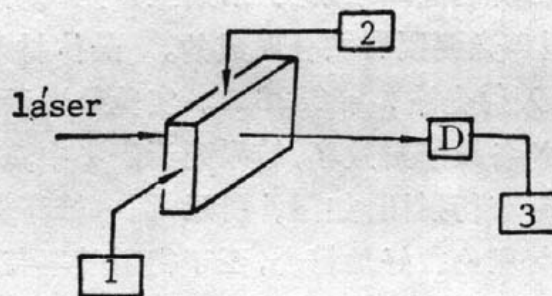


Fig. 4 Experimental setup

- 1, 2 AO power source;
3 laser power dynamometer

参 考 文 献

- [1] I. C. Chang; *IEEE Trans. Sonics & Ultrasonics*, 1976, **SU-23**, No. 1 (Jan), 2~21.
 [2] 董孝义, 张小洁, 盛秋琴; 《光学学报》, 1985, **5**, No. 12 (Dec), 1074.
 [3] 张小洁, 陈熙, 董孝义; 私人通信。
 [4] Dong Xiaoyi, Zhang Jianzhong, Sheng Qiuqin; *Optik*, 1989, **82**, No. 4, 139.
 [5] 徐介平; 《声光器件的原理、设计、应用》, 第二章, 科学出版社(1982)。

2-D acousto-optic interaction theory and experimental analysis

REN ZHANXIANG, DONG XIAOYI, ZHANG JIANZHONG AND SHENG QIUQIN

(Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin)

ZHAO QIDA AND HU TAIYI

(Department of Applied Physics, Beijing Institute of Technology)

(Received 10 January 1990; revised 14 June 1990)

Abstract

The universal coupling wave equation of two-dimension acousto-optic effect is deduced. The solution of Normal Raman-Nath A-O diffraction is derived from it. The theory is compared with the experimental result of 2-D A-O devices consisting two 1-D modulator. They are in correspondence.

Key words: coupling wave equation; Raman-Nath Acousto-Optic interaction; two dimension A-O interaction.