

判定声光调制器声场状态的实验方法

董孝义 盛秋琴

(南开大学近代光学研究室)

提要: 目前,激光器声光主动锁模主要使用驻波型声光调制器,调制器的工作状态对模式锁定与锁模脉冲有显著的影响。本文以 Raman-Nath 型调制器为例提出几种判定声场驻波状态的实验方法。

Experimental methods for discriminating sound field state of acousto-optic modulators

Dong Xiaoyi, Shen Qiuqing

(Modern Optics Laboratory, Nankai University)

Abstract: At present, stationary acousto-optic modulator is used for actively acousto-optic mode-locking of lasers. The operation state of modulator has its obvious influence on mode-locking and mode-locked pulses. This paper presents some experimental methods for discriminating the sound field states taking Raman-Nath modulator as an example.

一、基本原理

Raman-Nath 型声光衍射效应已在光通讯、光测量、光脉冲以及集成光学等方面得到广泛应用。对于这类衍射效应的分析证明^[1],当声场处于行波状态或驻波状态时其结果有着明显的差别。

在行波情况下,声场可以看作是移动的相位光栅, n 级衍射光波的一般形式可表示为:

$$J_n(v) \exp i(\omega_i + n\omega_s)t \quad (1)$$

其中幅度 $J_n(v)$ 是宗量为 v 的第 n 阶贝塞尔函数。 $v = \Delta n k_i W$, Δn 为声光介质的折射率调制幅度; W 为声光相互作用距离, $k_i = \omega_i/c$,

ω_i 、 ω_s 分别为入射光波与声波的圆频率。由(1)式可以看到,不同衍射级的频率成分也不同,说明多普勒频移对衍射级的贡献是不同的,但无论那一级,其衍射强度($\propto J_n J_n^*$)都与时间无关,这是因为宗量 v 不包含时间变量。这时如测量各级衍射光强度应不出现交变成分,即在示波器上显示出来的只有直流

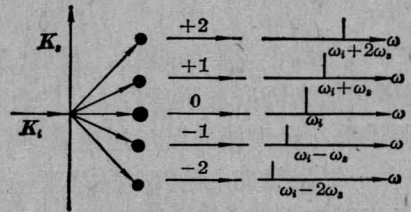


图 1

收稿日期: 1981年5月8日。

信号。如用 F-P 扫描干涉仪测量其频率特性, 则可得到图 1 所示的结果。

在驻波情况下, n 级衍射光波的一般形式为:

$$J_n(v \sin \omega_s t) \exp i\omega_s t \quad (2)$$

这时由于贝塞尔函数的宗量中出现时间变量, 因此, 对应各级衍射光强应有频率为 $2\omega_s$ 的起伏。例如在小信号情况下, 对于零级、一级衍射光强可近似写成下列形式:

$$I_0 \propto J_0 J_0^* = J_0^2(v \sin \omega_s t)$$

$$\approx 1 - \frac{1}{2} v^2 \sin^2 \omega_s t$$

$$I_1 \propto J_1 J_1^* = J_1^2(v \sin \omega_s t)$$

$$\approx \frac{1}{4} v^2 \sin^2 \omega_s t$$

由此可见, 衍射光强中含有频率为 $2\omega_s$ 的调制信号。声光主动锁模正是利用了驻波调制的这一特性。为了分析衍射光的频率特性, 我们还可以将 (2) 式展开^[2], 当 n 为偶数时有:

$$\begin{aligned} & J_{2n'}(v \sin \omega_s t) e^{i\omega_s t} \\ &= \sum_0^{\infty} (-1)^r J_{n'-r} \left(\frac{v}{2} \right) \\ & \times J_{n'+r} \left(\frac{v}{2} \right) \{ e^{i(\omega_s + 2r\omega_s)t} + e^{i(\omega_s - 2r\omega_s)t} \} \end{aligned} \quad (3)$$

当 n 为奇数时有:

$$\begin{aligned} & J_{2n'+1}(v \sin \omega_s t) \exp i\omega_s t \\ &= \frac{1}{i} \sum_0^{\infty} (-1)^r J_{n'-r} \left(\frac{v}{2} \right) \\ & \times J_{n'+r+1} \left(\frac{v}{2} \right) \cdot \{ e^{i(\omega_s + 2r+1)\omega_s t} - e^{i(\omega_s - 2r+1)\omega_s t} \} \end{aligned} \quad (4)$$

其中 r 为大于或等于零的整数。显然, 这时测量各级衍射光应出现频率为 $2\omega_s$ 的交变信号, 其频谱分布应为图 2 所示的结果。图 3 则为零级、一级衍射光中的调制信号波形, 显然, 各级衍射都含有多级多普勒频移, 正负号的同时出现说明吸收与发射声子的过程同时存在。

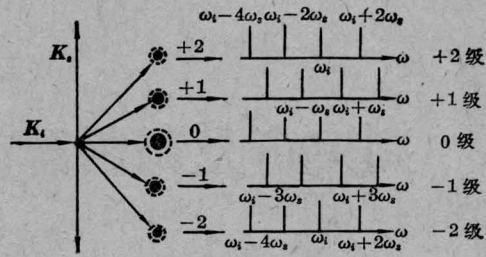


图 2

虚圆示意时间上的变化

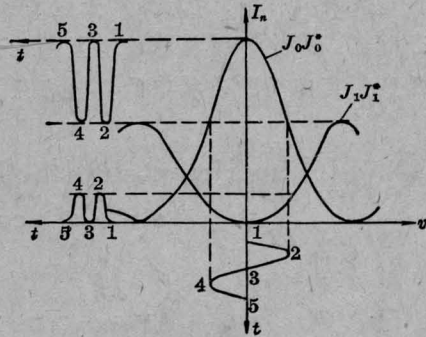


图 3

如上所述, 两种声场状态无论从时域还是从频域上分析其结果都是截然不同的。本文正是根据这一差别出发, 以求在实验上找到鉴别声场状态的简便方法, 并在声光主动锁模研究中加以实际应用。

二、实验方法

实际上, 由于上述两种结果的不同, 其应用范围、使用方法等也各有不同。但是, 在某些情况下, 这两种声场状态又难以截然分开。于是, 在某一特定的应用中, 一种声场状态将被认为是对另一种声场的干扰。例如, 在激光纵向模式锁定中驻波型声光调制器内行波成分的存在不但会使衍射效率降低, 而且还会导致调制波形失真, 使锁模脉冲出现亚结构等等。因此, 通过实验加以鉴别并设法予以克服将是十分必要的。根据上面分析结果, 可在实验上采取如下方法:

1. 测量某级衍射光束的时域特性

实验装置如图 4 所示。其中 AO·M 是声光调制器，光通过它时产生多级 Raman-Nath 衍射，并由光阑选定某级衍射光射入光电倍增管 (PMT)，这样便可通过示波器观察各级衍射光的时域信号。对于下面四种情况，可观察到四种不同的结果。

① 完全行波状态 (即调制器底面上声波反射系数 $\rho=0$, 因此驻波系数 $S=1+\rho/1-\rho=1$)。根据 (1) 式, 这时由于各衍射级皆无交变成分, 故从示波器上分别观察到的只是各级衍射光所对应的直流电平, 由此可以计算出相应各级的衍射效率。

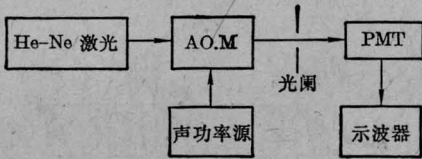
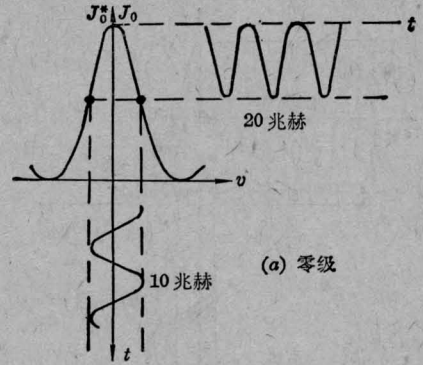


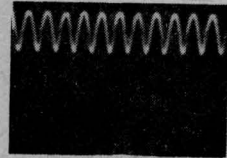
图 4

② 完全驻波状态 (即 $\rho=1, S \rightarrow \infty$)。根据 (2) 式, 这时从示波器上观察各级衍射光均含有调制信号成分, 其调制频率一般为 $2\omega_s$ 。图 5 分别为零级和一级衍射光强及其调制信号的示波图。所加声场驱动频率为 $f_s=10$ 兆赫时, 可从示波器上观测到交变信号, 其频率为 $2f_s=20$ 兆赫, 恰好为声频的二倍。图 5 中的照片即是在这种情况下拍摄的 (使用的是 SR-24 型示波器, 扫描档为 0.5 微秒/格)。这时可根据示波图 (包括直流电平) 很容易计算出各衍射级的衍射效率及其调制度, 这里需要指出的是, 由于声波驱动功率的大小不但会影响调制信号的波形而且会影响调制频率的大小, 因此在分析锁模脉冲时这点也是需要考虑的因素之一*。

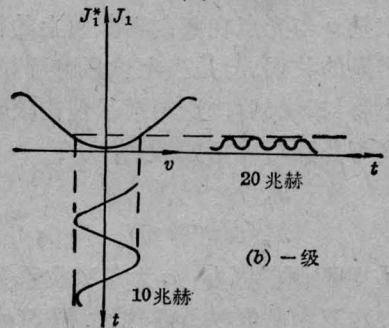
③ 含有行波成分的驻波状态 (即 $\rho < 1$, 驻波系数为有限值)。对于零级衍射光可观测到如图 6 所示的波形, 这时可根据调制信号幅度 (图中 B) 与行波衍射光栅造成的零级光损失 (图中 A) 大小估算出驻波系数:



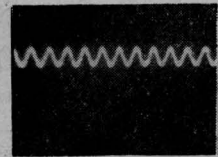
(a) 零级



(a')



(b) 一级



(b')

图 5

$$S = \frac{A+B}{A}$$

由于工作点 α 所处位置与行波声场有关, 所以直流电平 A 的高低可看作是行波成分大小的反映, 对于一级衍射光也可得到类似的结果, 同时也可以看出, 行波成分的存在直接影响衍射效率、调制度的大小, 而且还会导致调制信号的波形失真等等。

④ 声吸收及类似因素存在的影响。这是一种可导致调制波形严重失真的情况。在激

* 有关这方面的分析和讨论已超出本文范围, 准备另文叙述。

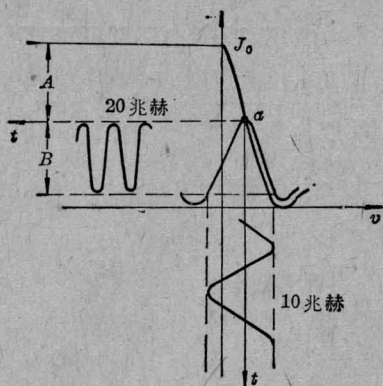


图 6

光锁模中它有可能诱发高级极化,从而使锁模脉冲变坏,对于这类情况可作如下解释(图7)。在不存在明显的声吸收或类似因素影响时,宗量 v 与光点在调制器截面上的位置 x 没有明显的关系,但是当上述影响明显时, v 的大小将与 x 有关,这时对于前向波和后向波幅度可分别写成下列形式:

$$\begin{aligned} J_n(v e^{-\alpha x}); \\ J_n(v e^{-\alpha(2L-x)}), \end{aligned} \quad (5)$$

这里 L 是调制器厚度; α 为声吸收系数。这样就导致调制曲线的不对称性,图 8(a) 是这种不对称性夸大的示意图(这里取 x 为参数, x 越小,曲线不对称越严重),并划出了相应的调制信号波形,它是一种幅度高低交错变化的序列信号,从图中很容易看出,相邻幅度高低之差正是这种不对称性的反映,因此可用幅度差来表征声吸收的大小,图 8(b) 是在声吸收存在情况下拍摄的调制波形照片,光点所处位置为图 7 中的 D 点,从中可以明显地看到幅度高低交错变化的情形。由(5)式还可以看出:在 $x=L$ 处前向波与后向波具有相同的贝塞尔函数宗量,即仍然保持曲线的对称形式,这一现象可通过实验明显地观察到。显然,为了得到较好的调制波形,令光点在 $x=L$ 处将是最佳位置,它相当于图 7 中的 A 点。

类似的现象还会在下述一些情况下发生,例如光点在调制器截面横向边缘处(图中

B 、 C 等点)时,由于声场的发散会造成前向波与后向波的不对称;另外一种情况是在偏离驻波形成条件时发生的,即调制器厚度 L 与声波波长 λ_s 之间不满足下述关系:

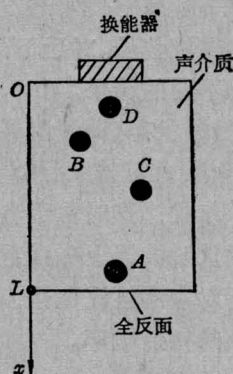
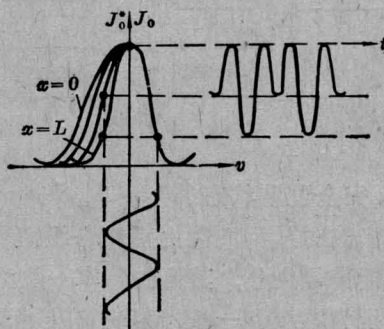


图 7



(a)



(b)

图 8

$$L = \frac{1}{4} \lambda_s (2m + 1) \quad (6)$$

其中 m 是大于或等于零的正整数。当然,在不满足(6)式时,由于没有形成驻波调制,所以观察不到调制信号。但是当接近满足条件(6)时,首先由部分前向波与后向波耦合形成驻波,而其它部分尚未发生耦合,则类似于波的衰减。因此,在上述情况下仍可预期得到与图 7 类似的结果。

2. 测量某衍射级的频域特性

实验装置如图 9 所示。利用 F-P 扫描干涉仪可直接显示某级衍射光的频谱成分,也可以得到如下几种情况:

① 完全行波情况。这时可得到与(1)式相应的频谱分布,如图 1 所示,各谱线强度由相应的贝塞尔函数决定。

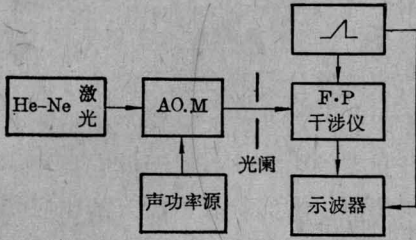


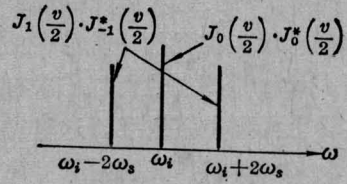
图 9

② 完全驻波情况。这时可得到与(2)式相应的频谱分布,如图 2 所示。各谱线强度由(3)、(4)式确定。图 10(a)、(b) 示出零级、±1 级的部分谱线。

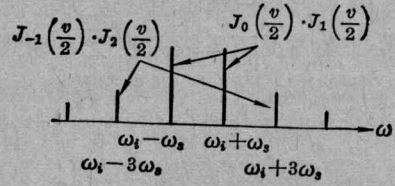
由以上两组谱线分布可以看出,行波与驻波情况下的频率成分有着明显的差别,因此,用这种方法鉴别声场状态将是十分简便的。

③ 当两种声场状态同时存在时,以 +1 级衍射光为例,应该有图 10(c) 所示的分布,它是图 1、图 2 相应成分的合成结果。这种谱线分布上的不对称,显然也可以作为驻波调制时有行波分量的判据。

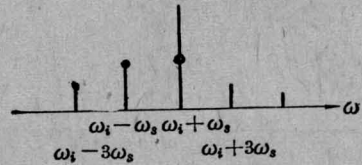
谱线分布的不对称还可因另外一种情况的出现而发生,即当声光介质有明显的声吸收而光点又处于非最佳位置时,或者在类似情况下,正如图 8 所示,其谱线分布相应也会发生畸变。这种现象在实验中很容易观测与判定。以零级衍射光为例,当声驱动功率 P 为零时可得到图 11(a) 所示的谱线分布,当声驱动功率 P 逐渐提高时可观察到中心频率 ω_i 向其它边频(这里主要是 $\omega_i \pm 2\omega_s$) 交换能量的过程。如果介质有显著的声吸收,则 ω_i 向 $\omega_i + 2\omega_s$ 和 $\omega_i - 2\omega_s$ 两个边频馈送的能



(a) 零级



(b) ±1 级



(c) +1 级有行波成分

图 10

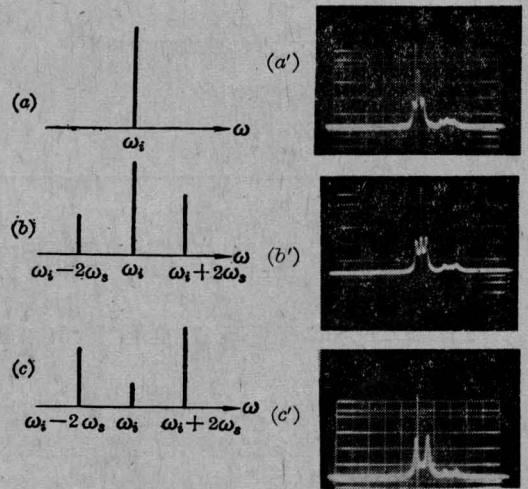


图 11

量不相等,当 P 进一步加大时,这种不对称性越为明显,如图 11(c)、(c') 所示*。如果这时调节光点在调制器截面上的位置,例如调节在 $x=L$ 附近时,这种不对称分布可明显减

* 此照片是用 470-03 型扫描干涉仪拍摄的,仪器带宽 $\delta=13$ 兆赫,谱线右部的次结构是另一横模。

少以至消除掉。可见,这在激光锁模中也是调节声光调制器最佳位置的一种简便方法^[4]。

对于 Bragg 型调制也可以作类似分析,并可在实验上得到类似结果。这里需要指出的是,由于 Bragg 型声光衍射具有简单的频谱分布^[3],所以,通过测量其频域特性判定声场状态比起 Raman-Nath 型来更为简便。图 12 所示是驻波情况下 1 级衍射光的频谱分布。当有行波成分时,则两条谱线便出现幅度差,如图 12 所示,其中 (b) 即为有行波分量的情况。显然,这种不对称性可作为声场状态的判定。

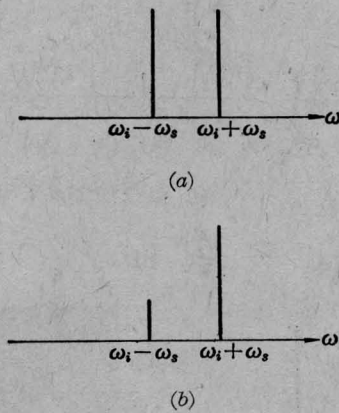


图 12

最后,需要指出的是,上述实验方法及其结果分析都是对“理想化”的声光调制器作出的^[5],即对工艺结构等方面实际存在的各种缺陷并未加考虑。例如因换能器与声光介质粘接得不好而引起的声波面的畸变,或因介质通光面的光学缺欠造成的光波前的失真等等都会严重地影响声与光的相互作用结果,从而使现象复杂化,以致无法对实验结果作完善的分析。显然当存在这类问题时,本文所提出的实验及分析方法就无意义了。因此,在制作声光调制器时,满足严格的工艺要求是十分重要的。另外,对于其它类型结构的声光调制器,本实验及分析方法也应作相应的更改,即具体情况作具体的分析。

杨性瑜同志协助作了部分测量工作,在此深表谢意。

参 考 文 献

- [1] C. V. Raman *et al.*; *Proc. Indian Acad. Sci.*, 1936, **A3**, 75.
- [2] 李荫远等;《非线性光学》,科学出版社,1974.
- [3] Amanon Yariv; “Quantum Electronics”, 1976.
- [4] M. H. Crowell; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1965, **QE** -1, 12.
- [5] 董孝义等;《激光》, 1981, **8**, No. 2, 13.

全国“化学中的激光”会议在大连召开

1981年11月12日至15日,全国“化学中的激光”会议在辽宁省大连市举行。

会议分两个阶段进行。在第一阶段的一天半大会报告中,共交流了九篇特邀报告,对激光化学、化学激光、应用激光光谱学、激光诱导化学反应、激光分离同位素、激光在化学中的应用、射流激光光谱等方面的国内外发展和研究动向作了较为全面的探讨。

之后,又分以下三个小组进行了专题交流:(1)化学激光与气流激光器件;(2)激光化学与微观反应动力学;(3)化学中的激光技术。分组会上宣读的80多篇论文,对化学激光器、激光诱导化学反应、红外多光子离解、激光同位素分离、激光光谱学及其

在化学中的应用、新型激光染料等问题进行了专题交流和讨论。在化学激光器件方面,已开始深入细致的基础研究,在光引发、电子束引发和流动型器件方面,已取得了一定成果,并开展了化学激光的数学模拟工作,对各种测试手段的研究工作正在深入进行。化学激光的其他领域也取得了可喜成果。

这是一次化学和物理学相互渗透、相互促进的学术交流会,参加这次会议的140多名代表中,有从事化学工作的科技工作者,也有物理学领域的科技人员,他们的相互协作和支持,将对化学中的激光这一边缘学科产生深远影响。

(吉 禾)