

驻波声光效应对激光相干性的 两维调制

董孝义 盛秋琴 夏顺保 王许明 张小洁

(南开大学现代光学研究所)

提要: 给出两维超声驻波调制光学相干度的理论,并作出了相应分析。理论结果表明,当使用具有同频且相位相关的两维超声驻波场时,两超声场间的相位差(即关联因子)对相干度调制有显著影响,而在使用超声行波时这种影响则很小。

用交叉电极和电光晶体声共振效应激励起来的二维超声驻波场进行了实验,结果与理论分析大体相符。

2-D modulation of spatial coherence of laser light by standing A-O effect

Dong Xiaoyi, Sheng Qiuqing, Xia Shunbao, Wang Xuming, Zhang Xiaojie

(Institute of Modern Optics, Nankai University)

Abstract: The theory on optical coherence modulation using 2-D ultrasonic standing waves is reported and corresponding analyses are made. Theoretical results show that when 2-D ultrasonic standing waves are used, the phase difference between two ultrasonic waves (i. e., correlation coefficient) with the same frequency and correlated phase has strong influence on modulation of coherence degree and that effect is small when ultrasonic travelling wave are used.

Also reported are the preliminary measured results on coherence degree modulated with 2-D ultrasonic standing waves excited by two cross electrodes and AO-EO resonant coupling effects of LN EO-crystal respectively. The results agree with the theoretical analysis.

我们曾报道过利用驻波 Raman-Nath 型声光器件调制光学相干度的理论和有关实验结果^[1]。最近我们将理论进一步推广到两维,同时还将在 Ohtsuka 的两维行波理论^[2]推广到两超声波场同频相关的场合,并证明,两波场相位差(即关联因子)的大小对消相干有调

节作用;但在驻波情况下这种作用更显著些。

铌酸锂等材料制成的电光调制器在声共振状态下可形成两维驻波声场^[3],根据我们的理论,可以预示这类电光晶体也具有调制激光相干度的能力。

收稿日期:1984年8月19日。

声光介质中某点 $P(x, y)$ 处的折射率可表示为

$$n(p, t) = n_0 + \Delta n_x \sin(k_x \cdot x) \sin(\Omega_x \cdot t) + \Delta n_y \sin(k_y \cdot y) \cdot \sin(\Omega_y \cdot t + \varphi) \quad (1)$$

式中 Ω_x, Ω_y 和 k_x, k_y 分别表示 x, y 方向上超声波的角频率和波数, φ 表示两个方向的折射率波动的位相差, 一般情况下可认为是两超声驱动源驱动频率的位相差。下面分两种情况进行分析。

1. 若 x, y 方向的超声场不相关, 根据定义可得^[1]

$$G_{12}(x_1, y_1, x_2, y_2, v_x, v_y) = \langle \exp\{v_x(\sin k_x \cdot x_1 - \sin k_x \cdot x_2) \sin \Omega_x t + v_y(\sin k_y \cdot y_1 - \sin k_y \cdot y_2) \sin \Omega_y t\} \rangle \quad (2)$$

$$\text{令 } u_1 = v_x(\sin k_x \cdot x_1 - \sin k_x \cdot x_2); \\ u_2 = v_y(\sin k_y \cdot y_1 - \sin k_y \cdot y_2)$$

则(2)式可改写为

$$G_{12}(x_1, y_1, x_2, y_2, v_x, v_y) = \langle \sum_m \sum_l J_m(u_1) e^{im\Omega_x t} \cdot J_l(u_2) e^{il(\Omega_y t + \varphi)} \rangle \\ = \sum_m \sum_l J_m(u_1) \cdot J_l(u_2) \cdot \langle e^{i[(m\Omega_x + l\Omega_y)t + l\varphi]} \rangle \quad (3)$$

因频率 $m\Omega_x \neq -l\Omega_y$, 除非 $m=l=0$, 故有

$$G_{12}(x_1, y_1, x_2, y_2, v_x, v_y) = J_0(u_1) \cdot J_0(u_2) \\ = J_0 \left\{ 2v_x \sin \frac{\pi}{\Lambda_x} (x_1 - x_2) \right. \\ \left. \times \cos \frac{\pi}{\Lambda_x} (x_1 + x_2) \right\} J_0 \left\{ 2v_y \sin \frac{\pi}{\Lambda_y} \right. \\ \left. \times (y_1 - y_2) \cos \frac{\pi}{\Lambda_y} (y_1 + y_2) \right\} \quad (4)$$

2. 两超声波场相关时, 即有 $\Omega_x = q\Omega$, $\Omega_y = p\Omega$, q, p 为一组互质数, 则由(3)式可得

$$G_{12}(x_1, y_1, x_2, y_2, v_x, v_y) = \sum_m \sum_l J_m(u_1) J_l(u_2) \langle e^{i[(mq+lp)\Omega t + l\varphi]} \rangle$$

只有当 $m = -NP, l = Nq$ 时求平均才不为零, 故得

$$G_{12}(x_1, y_1, x_2, y_2, v_x, v_y) = \sum_N J_{NP}(-u_1) J_{Nq}(u_2) e^{iN(q\varphi)} \\ = \sum_N J_{NP} \left\{ -2v_x \sin \frac{\pi}{\Lambda_x} (x_1 - x_2) \right. \\ \left. \times \cos \frac{\pi}{\Lambda_x} (x_1 + x_2) \right\} J_{Nq} \left\{ 2v_y \sin \frac{\pi}{\Lambda_y} \right. \\ \left. \times (y_1 - y_2) \cos \frac{\pi}{\Lambda_y} (y_1 + y_2) \right\} e^{iNq\varphi} \quad (5)$$

特别是当两超声波场同频率时, 即 $p=q=1$, $\Lambda_x = \Lambda_y = \Lambda$, 上式可进一步简化为

$$G_{12}(x_1, y_1, x_2, y_2, v_x, v_y) = J_0 \{ (u_1^2 + u_2^2 + 2u_1 u_2 \cos \varphi)^{1/2} \} \quad (6)$$

如 $\varphi=0$, 则有

$$G_{12}(x_1, y_1, x_2, y_2, v_x, v_y) = J_0(u_1 + u_2) \quad (7)$$

上述各式, 当取 $v_x=0$ (或 $v_y=0$) 时即可化为一维超声波场的结果。不难看出, 它与文献[1]中的(6)式是吻合的。

二、

Y. Ohtsuka 已经从理论上推导出二维超声行波场频率不相关情况下的调制因子 G_{12} ^[2]。利用上述方法我们可以求同频相关情况下的调制因子的表达形式, 使其更有普遍意义。令 $\Omega_x = \Omega_y = \Omega$, 则有

$$G_{12}(x_1, y_1, x_2, y_2, v_x, v_y) = \langle \exp i \{ v_x \sin(\Omega t - kx_1) - v_x \sin(\Omega t - kx_2) + v_y \sin(\Omega t - ky_1) - v_y \sin(\Omega t - ky_2) \} \rangle \\ = \sum_m \sum_n J_m(V_1) \cdot J_n(V_2) \cdot \langle e^{i[(m+n)\Omega t + n\varphi - k(m\bar{x} + n\bar{y})]} \rangle \\ = J_0 \{ [V_1^2 + V_2^2 + 2V_1 V_2 \times \cos(\varphi - k\bar{y} - \bar{x})]^{1/2} \} \quad (8)$$

$$\text{式中 } V_1 = 2v_x \sin \frac{k}{2} (x_2 - x_1)$$

$$V_2 = 2v_y \sin \frac{k}{2}(y_2 - y_1),$$

$$(x_1 + x_2)/2 = \bar{x} \text{ 和 } (y_1 + y_2)/2 = \bar{y}.$$

三、

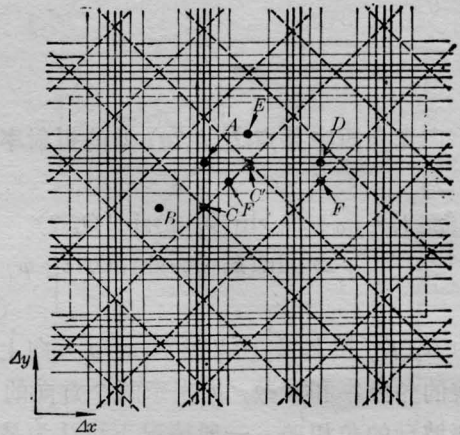
由(4)式与文献[1]的(6)式比较得知, 二维驻波声场的消相干作用有明显提高。除 $G_{12}=1$ 的一些特殊点外, 其它所有各点的光学相干度较一维情况都有不同程度的降低。当两个方向的消相干均最佳, 亦即 $G_{12}(x_1, x_2, v_x) = G_{12}(y_1, y_2, v_y) = 0$ 时, 总的消相干作用当然也最佳, 而且只要一个方向处于最佳消相干状态, 则不论另一方向如何, 其合成的消相干作用总是最佳的。

对于同频相关情况会导致一些有意义的结果。首先我们来看 $\varphi=0$ 的情况。这时的相干调制因子由(7)式给出, 如图1所示, 其中用实线示意 $u=u_1+u_2$ 的波动。由于 $u_1+u_2=0$ 的各点均有 $G_{12}=1$, 故无消相干作用, 这些点的连线在图中用虚线标出。由文献中的[1]式不难看出, 此时不能消相干的各点不一定与一维情况有对应关系。如图1中的(a)、(b)分别为 $v_x=v_y$ 和 $v_x < v_y$ 两种情况。显然, 它们的非消相干点的分布图样不同, 当 $v_x \rightarrow 0$ 时, 虚线变成虚折线, 并进一步趋向于 x 方向的直线, 亦即与一维情况相吻合。

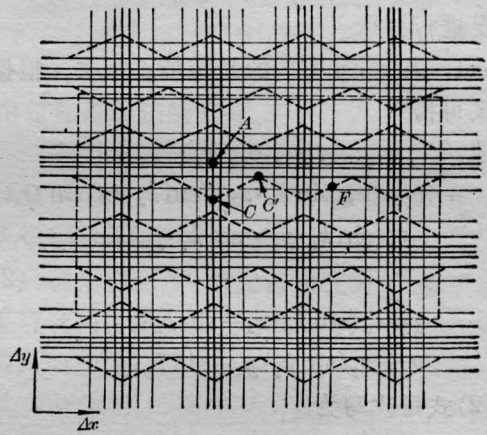
对于 $\varphi=0$ 情况, 令

$$U = (u_1^2 + u_2^2 + 2u_1u_2 \cos\varphi)^{1/2},$$

则 U 为贝塞尔函数 J_0 的宗量, 其大小可由图2中的 P 点径矢量的模来表征。显然, 在这里 φ 的大小对相干度也有调制作用。仅当 $u_1 \cdot u_2 = 0$ 时亦即一维情况下 φ 值才不起作用。当 $\varphi \neq 0$ (或 π) 时, $G_{12}=1$ 的区域明显比 $\varphi=0$ 时缩小。因此可以通过选择适当的 φ 值来提高消相干作用, 以致达到最佳消相干状态。例如图1(a)中 ($v_x=v_y=v$) 在 A 、 B 点, $\varphi=0$ 时, $u=4v$, 而 $\varphi=\pi/2$ 时, $u=2\sqrt{2}v$; 对于 C 、 C' 点, $\varphi=0$ 时, $u=0$, 而 $\varphi=$



(a)



(b)

图1 二维 (u_1+u_2) 超声驻波示意图

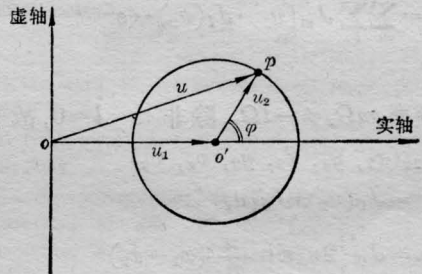


图2 矢量图

$\pi/2$ 时, $u=2\sqrt{2}v$; 对于 D 、 F 点, $\varphi=0$ 时, $u=2v$, 而 $\varphi=\pi/2$ 时, $u=2v$; 只有 E 点 $\varphi=0$ 和 $\varphi=\pi/2$ 时 u 皆为零。由此可见, 除了消除掉 C 、 C' 点对应的零值外, FC 与 FC' 间各点的消相干作用也在不同程度上得到提高, 只有 E 点上仍保持不能消相干。总括观之, 非消相干作用区域大为减小。对于 $v_y >$

v_x , 即图 1(b)所示, 基本上如同 $v_x=v_y$ 的情况, 但此时消相干作用要差一些, 而且 v_y 、 v_x 之间差异越大, 消相干作用的降低也越显著。当其中之一(v_x 或 v_y)趋于零, 即转变为一维情况。由此可得出结论: 关联因子 φ 的选值可以改善消相干作用, 而且若以信号调制 φ 值, 则可以得到相干度的调制。

四、

产生两维超声驻波场的方法很多^[1, 3, 4]。我们分别用交叉电极和电光晶体声共振效应激励起来的两维驻波声场进行实验。实验装置如图 3 所示。He-Ne 激光经扩束器扩束后射入具有两维驻波声场结构的声光调制器(AOD)。调制器由高频信号源驱动, 产生的两维声场与入射相干光场发生作用, 其后插入可产生干涉图样的各种装置(双狭缝、双圆环、方框等)。由此产生的干涉图样以及经声光作用图样的变化情况均可在后面的小屏上拍摄。为了精确测量因声光作用引起的消相干效应, 在小屏后还安置了自制光纤扫描光强分布测量仪, 测量信号由 X-Y 记录仪绘出。根据所测分布曲线, 即可计算出干涉条纹可见度, 进而计算出调制相干因子 G_{12} 的值^[1]。测量结果如下:

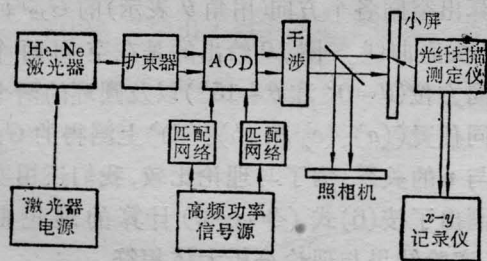


图 3 实验装置原理图

1. 二维超声驻波声场结构及其声光衍射谱。使用同一高频功率信号源驱动交叉电极时所得结果如图 4、图 5 所示。其中声场结构是用 Hiedeman 方法^[3]拍摄的。

2. 利用双缝装置观测调制相干度或消

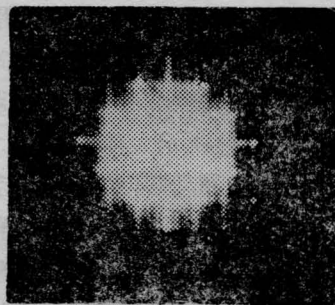


图 4 两维超声驻波图
($v=1.0, f=10.1\text{MHz}$)

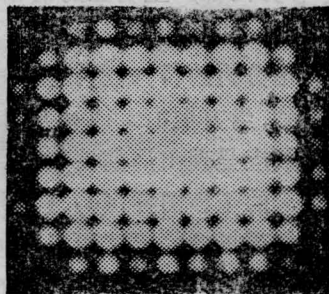


图 5 两维声光衍射图
($v=1.0, f=10.1\text{MHz}$)

相干效应。将一双狭缝沿 x 方向置于声光调制器之后, 在小屏上即可观察到相应的干涉图样。图 6 为加声场后(即 $v \neq 0$ 时)拍摄的干涉图, (a)、(b)、(c) 分别代表双缝处于三个不同位置(x_1x_2, x_3x_4, x_5x_6)时的情况。用光纤扫描测试并计算出相应的 $G_{12}(v)$ 值, 其结果与一维情况^[1] 相符; 并且证明: ①因驻波型声光作用致使激光的空间相干性受到调制; ②有些空间部位消相干作用极为明显, 有些部位

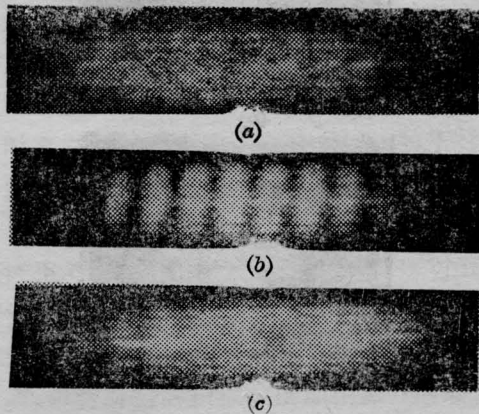


图 6

则不明显；③这种消相干的调制作用与两点的相对坐标(即双缝的坐标位置)有关，并且随之呈现出周期性变化。这些结果与上述理论分析，例如式(7)所示大体相符。

3. 利用方框、双圆环装置观测空间消相干效应。方法同上，拍摄的干涉图样如图7、图8所示。其中图7的(a)、(b)、(c)分别对应不加声场、加声场以及加声场、但在 x 、 y 方向上声场强度不等的情况。不难看出，加声场后在 x 、 y 方向都产生明显的消相干效应。用光纤扫描测试并经计算表明， $G_{12}(v) \sim v$ 关系与上述理论分析的(7)式所指基本吻合。而且也可观察到，当方框沿 x 或 y 方向移动时，这种消相干效应呈现出周期性变化。图8是由双圆环引起的干涉图样，(a)、(b)分别对应不加声场和加声场的情况，可见在 v 足够高时，在空间各个方向上均产生明显的消相干效应。

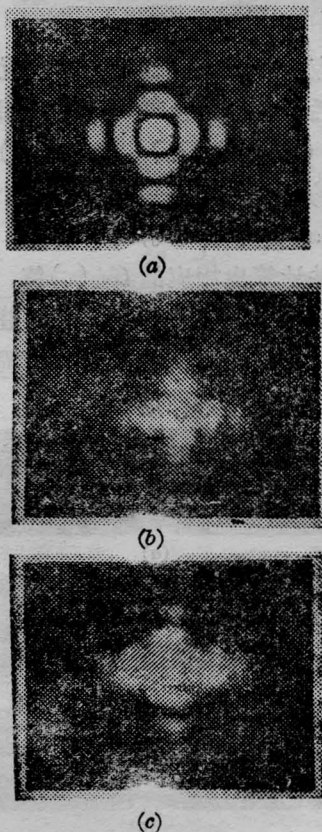
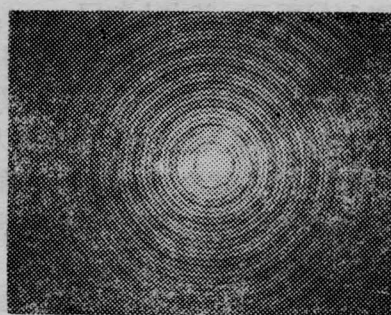
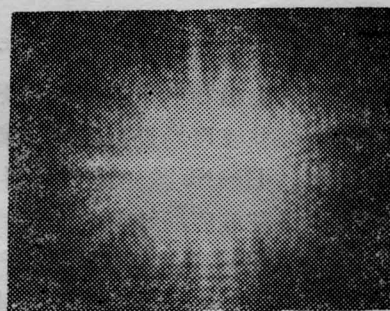


图7



(a)



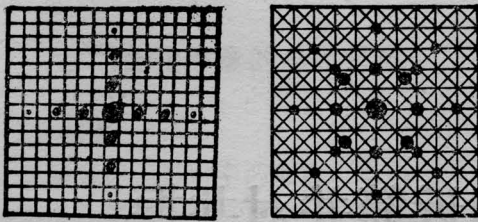
(b)

图8

4. 利用LN电光晶体声共振效应产生的二维超声驻波场进行调制相干度实验。图9是利用同一个高频信号源激励起来的二维超声驻波场的衍射谱。如改变频率大小还可以得到其它多种形式的衍射谱^[3]。利用图9(b)的声场形式，并使用双圆环装置产生干涉图样，由 X - Y 记录仪测得的光强分布曲线可计算出空间各个方向(用角 θ 表示)的 $G_{12}(v) \sim v$ 关系曲线。图10给出的是在空间两个不同方位($\theta=0^\circ$ 和 $\theta=15^\circ$)以及圆环的两个不同位置((a)、(c)和(b)、(d))上测得的 G_{12} 值与 v 的关系，为了与理论比较，我们还用实线画出了按(6)式(令 $\varphi=0$)计算的理论曲线，实验结果与理论分析大体相符。

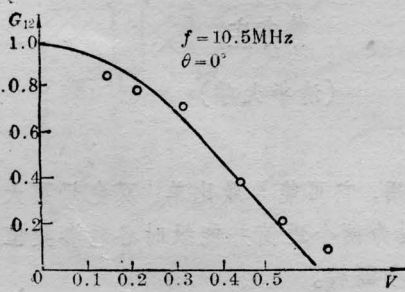
我们还利用LT电光晶体、ADP、KDP电光晶体进行了实验，结果也是满意的。由于电光调制器较之声光器件有结构简单、加工容易、使用方便等优点，故更有实际意义。

白荣波、高钊、陈平等同志参加了部分实验工作，在此一并致谢。

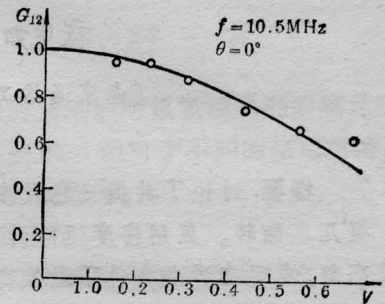


(a) $f=16\text{MHz}, x=0.8$ (b) $f=10.5\text{MHz}, v=0.8$

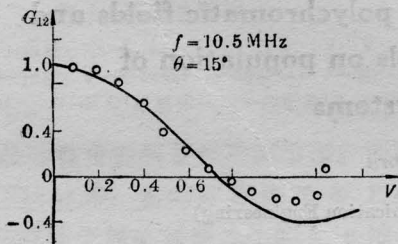
图 9



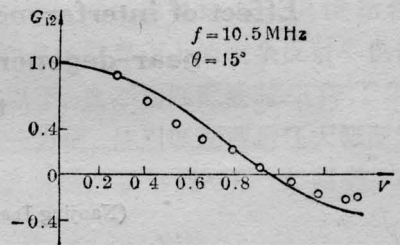
(a)



(b)



(c)



(d)

图 10

光纤电流传感器原理试验样机通过鉴定

光纤测电流的基本原理是利用光纤材料的法拉第效应(熔石英的磁光效应),即处于磁场中的光纤会使在光纤中传播的偏振光发生偏振面的旋转,其旋转角度与磁场强度、磁场中光纤的长度成正比,再利用安培环路定律,即可测量长直线中的电流。光纤电流传感器具有电绝缘性能好、抗电磁干扰能力强、灵敏度高、动态范围大、安全可靠等优点,便于用计算机数据处理和管理。

清华大学无线电电子学系与电力科学研究院电测量所共同承担国家科委新技术局“六五”重点攻关

项目“光纤传感器测量超高压线路电流的研究”。该任务的前期工作“光纤电流传感器原理实验样机”已由清华大学完成,并于1985年7月2日进行了鉴定。

该原理样机的测量范围为0~1200 A,最大2500 A;准确度已达0.5%,信噪比大于80 dB,系统的等效Verdet常数为0.0154分/A,所用光纤总长度为23 m,采用微计算机采集和处理数据。与国际上80年代同类成果相比,有所创新。

(清华大学无线电电子学系 廖廷彪)