

## LN 调制器电光与声光效应的共振耦合

董孝义 盛秋琴

(南开大学现代光学研究室)

**提要:** 本文报导和讨论了激光 FM 锁模中 LN 调制器电光与声光效应之间的共振耦合现象。

## Resonant coupling between EO and AO effects of LN modulators

Dong Xiaoyi, Sheng Qiuling

(Modern Optics Laboratory, Nankai University)

**Abstract:** In this paper the resonant coupling phenomenon between EO and AO effects of LN modulators in the FM mode-locking of lasers is reported and discussed.

## (一)

铌酸锂一类晶体在有外加电场  $E$  和应变  $S$  时, 均可引起晶体折射率相关部分发生变化, 其变化的关系是<sup>[1]</sup>:

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_i = \sum_{j=1}^6 P_{ij} S_j + \sum_{j=1}^3 r_{ij} E_j \quad (1)$$

其中  $P_{ij}$ 、 $r_{ij}$  分别为晶体的光弹系数张量和电光系数张量, FM 锁模主要应用晶体的电光效应, 故(1)式只有第二项有贡献。但是, 由于晶体的逆压电效应, 所加电场也必将引起晶体产生相关的应变  $S$ <sup>[2]</sup>:

$$S_i = \sum_{j=1}^3 d_{ji} E_j \quad (2)$$

其中  $d_{ij}$  是晶体的压电系数张量。由  $S_i$  产生的效应迭加在原有电光效应上, 或使之加强, 或使之减弱, 或出现较为复杂的现象。

在激光 FM 锁模中, 加在 LN 晶体的电场为交变电场, 由压电效应引起的  $S$  将表现为应变波。于是光弹效应以声光衍射的形式出现, 当所加电场频率  $f$  满足下列条件

$$f = \frac{v_s}{2h} M \quad (3)$$

时<sup>[3]</sup>, 应产生驻波型 Raman-Nath 衍射\*。式中  $v_s$  为晶体中的声速;  $h$  (或  $W$ , 见图 1) 为晶体的几何尺寸;  $M$  为大于零的正整数。

激光 FM 锁模中使用的晶体结构如图 1 所示。根据(1)、(2)式以及文献[1, 4~6]给出的有关 LN 晶体数据, 在  $y$  轴加电场时,

收稿日期: 1982 年 4 月 7 日。

\* 由 Bragg 衍射判据<sup>[6]</sup>可知, 在我们实验中使用的 LN 调制器(长度为 2 厘米)相应的特征频率约为:

$$f_M \approx \left(\frac{2v_s}{\lambda L}\right)^{1/2} \approx 100 \text{ 兆赫}$$

而在实验中所使用的频率皆满足  $f < f_M$ , 故只应出现 Raman-Nath 衍射形式。

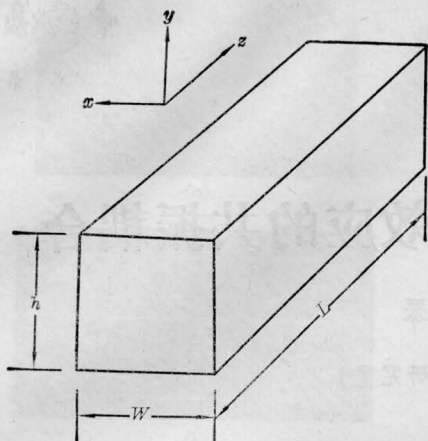


图 1

$h=2.2$  毫米;  $W=2$  毫米;  $L=20$  毫米

不难算出折射率的变化:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_5^A = \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_6^A = \left(\frac{1}{n^2}\right)_3^A = 0 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_1^A \approx -0.45 \times 10^{-11} E_y \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_2^A \approx +0.45 \times 10^{-11} E_y \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_4^A \approx +1.3 \times 10^{-11} E_y \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_5^E = \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_6^E = \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_3^E = 0 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_1^E \approx -0.34 \times 10^{-11} E_y \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_2^E \approx +0.34 \times 10^{-11} E_y \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_4^E \approx +2.8 \times 10^{-11} E_y \end{array} \right. \quad (5)$$

式中角标  $A, E$  分别表示声光与电光的贡献。由此可以看到, LN 晶体中的声光作用可以达到与电光相比拟的程度, 而且它们都出现在  $xx(i=1)$ 、 $yy(i=2)$  与  $yz(i=4)$  有关方向上。

## (二)

### 实验及其结果分析

1. He-Ne 激光器腔外 FM 锁模。实验装置如图 2 所示。图 3 是在锁模状态下, 用

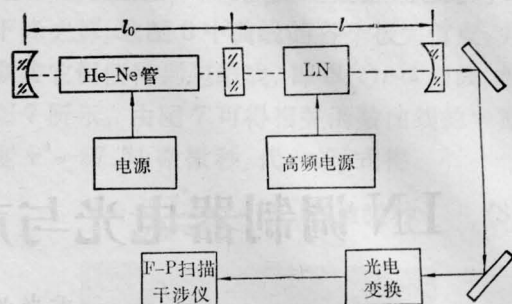


图 2

(激光器有效腔长  $l=83.6$  厘米; 锁模频率  $f=89.70$  兆赫;  $P_0=15$  毫瓦)

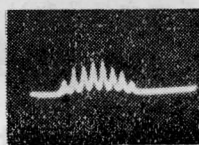


图 3

(纵模间距:  $\Delta\Omega \approx 179.43$  兆赫; 调制器驱动频率:  $f=89.70$  兆赫; 驱动功率:  $P_0 \approx 1$  瓦)

F-P 扫描干涉仪拍摄的模谱图。

为了得到新的锁模状态, 调节腔长  $l, l_0$  并随之改变调制器驱动频率  $f$ , 使之满足<sup>[7]</sup>:

$$f = c/Nl$$

$c$  为光速,  $N$  为大于零的正整数。这时可以发现在某些频率上产生明显的 Raman-Nath 衍射, 使锁模状态遭到破坏, 根据 (3) 式, 这时腔长  $l$  的数值是

$$l = ch/MNv_s \quad (6)$$

在我们的实验中  $M$  可以选几十个值; 由于  $h, W$  不等, 纵向声速与切向声速也不等, 所以实际上共振频率极多, 在我们的实验条件下可达几百个点。在腔外锁模时  $N$  又可选用很多值, 因此因共振不能进入锁模状态的  $l$  值实际上也极多。我们选用的腔长为 83.6 厘米, 对应的频率为 89.7 兆赫 ( $N=2$ ), 避开了共振点。

2. 观测共振耦合时的 Raman-Nath 衍射图样。实验装置如图 4 所示。He-Ne 激光通过光阑进入 LN 调制器, 调制信号由高频信号源经可调匹配网络馈入, 通过调制器

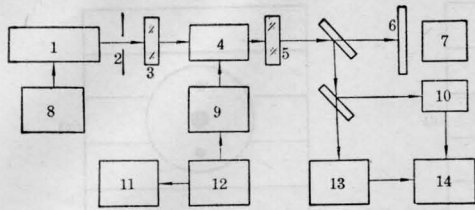


图 4

1—He-Ne 激光器; 2—光阑; 3—波片; 4—LN 晶体; 5—偏振片; 6—屏; 7—照相机; 8—电源; 9—匹配网络; 10—PMT; 11—数字频率计; 12—高频电源; 13—F-P 扫描干涉仪; 14—OS.

的激光因电光作用而载入高频信息, 在正常情况下可由 PMT 检测解调, 直接在示波器上将高频信号显示出来, 如图 5 所示。调节信号源频率并调节与其相关的匹配网络, 可以发现在一系列频率上出现共振耦合, 这时在光路末端的小屏上观察到各种样式的 Raman-Nath 衍射光斑。图 6 给出了几种典型的观测结果, 显然, 图 6 ①、② 衍射形式与 (4) 式中的  $i=1$ , 即  $xx$  项相对应。根据衍射点的间距以及小屏与 LN 晶体的距离可以计算出相应的衍射角  $\theta$ 。计算值与 Raman-Nath 理论公式<sup>[6]</sup>:

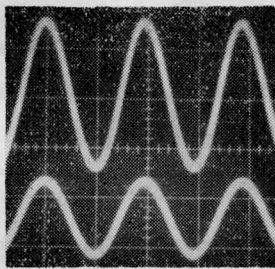


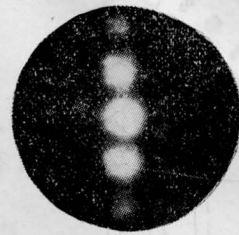
图 5

(上述为调制器驱动波形, 下述为检测的电光波形, 0.05 微秒/格)

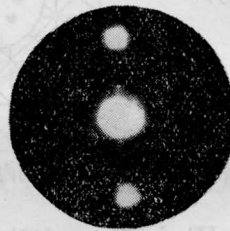
$$\theta = \sin^{-1}(\pm m\lambda/\lambda_s) \quad (7)$$

基本相符。图 6 ③、④ 与 (4) 式中的  $i=2$ , 即  $yy$  项的情况相对应。⑤、⑥ 则是  $xx$ 、 $yy$  方向同时形成超声驻波的情况。关于 ⑦、⑧ 衍射图样, 我们认为它是由于声波在  $xy$  面内多次反射形成驻波引起的衍射。此外还出现 ⑨ 所示的一种情况, 它属于  $xx$  方向的纵向驻波

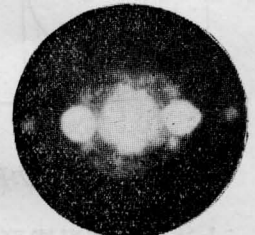
与  $yz$  面沿  $x$  方向的切向驻波同时存在的一种衍射形式。



①  $f=24.64$  兆赫



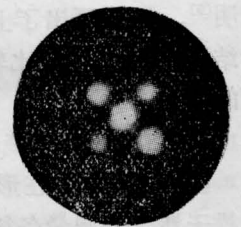
②  $f=47.68$  兆赫



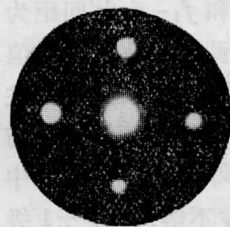
③  $f=25.37$  兆赫



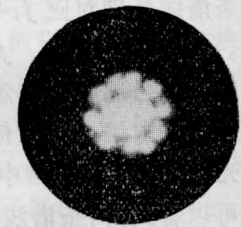
④  $f=41.8$  兆赫



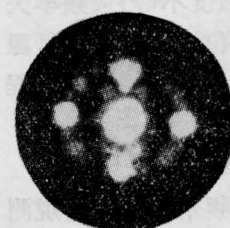
⑤  $f=16.43$  兆赫



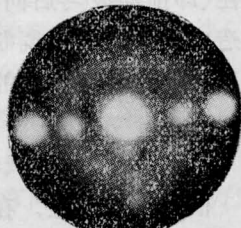
⑥  $f=40.10$  兆赫



⑦  $f=15.56$  兆赫



⑧  $f=34.24$  兆赫



⑨  $f=33.38$  兆赫

图 6

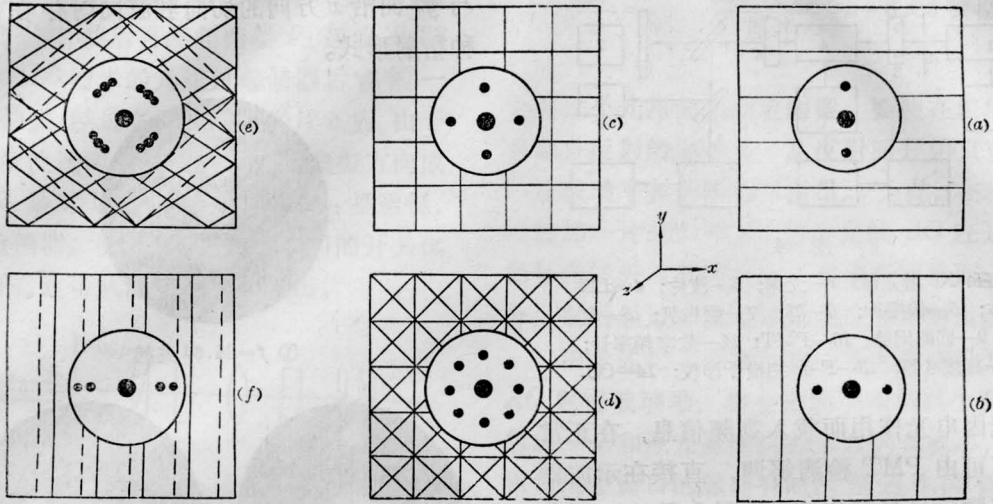


图 7

（“—”为声共振驻波波节线，图中圆内指示为对应的衍射图样， $E_x = E_z = 0, E_y \neq 0$ ）

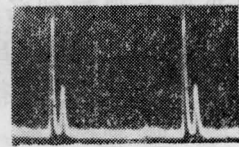
上述几种情况皆可用 Hiedemann 方法观测到声场结构，即根据相位光栅形状加以证明<sup>[9]</sup>。图 7 画出了上述几种情况对应的声场结构。为了利于比较，还在图中画出了相应的衍射图样。

### 3. 衍射光的频域特性

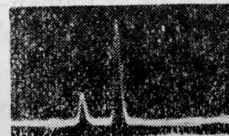
按图 4 装置，在形成共振耦合时用 F-P 扫描干涉仪可测量各衍射点的频域特性。图 8 是一级衍射光的测试结果。从中可以看到，两条谱线分别对应  $f_i + f$  和  $f_i - f$ ，其间距为  $2f$ 。这里  $f_i$  为光频， $f$  为调制频率。测量值与高频信号源频率指示相符。证明此时为驻波声光衍射谱。电光信息由于其频谱成分与声光同，故难以在谱中分离出来。从图 8 中还可以看到，两条谱线幅度不等，而且  $\pm 1$  级恰好对称，这是由于光束通过调制器的位置不佳（即前向波与后向波强度不等）或频率失谐造成的<sup>[3]</sup>。调整调制器位置或微调信号源频率可使这种幅度上的差异减小到最低程度。

### 4. 衍射光的时域特性

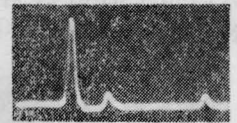
根据图 4 装置，在高频示波器上可观测各衍射光的时域信号。在没有发生 Raman-Nath 衍射的频率上，光点只含有电光信息，



(a) 锁模间距  $\approx 590$  兆赫



(b) +1 级谱



(c) -1 级谱

图 8 一级衍射光的频谱

（晶体驱动功率： $P \geq 0.5$  瓦；频率： $f = 41.8$  兆赫；F-P 扫描干涉仪为 470-03 型）

因此频率与调制器信号源指示相同，如图 5 所示。在声共振频率上，单谱扩展为多谱，各衍射光点除含有电光信息外，尚含有声光信息，二者在频率上相差一倍（忽略高次谐波）。另外，对于不同的衍射点，二者的相位差也有所不同，因此由电光与声光合成的时域信号具有多种形式。图 9 给出了声光、电光信号相位差分别为  $0^\circ$ 、 $180^\circ$  的示波图。可以看出它是频率为 19.43 兆赫（电光）与 38.86 兆赫（声光）的合成信号。

（下转第 92 页）

$=2.2$  伏,  $I(x_2)=1.2$  伏,  $I(x_3)=1.7$  伏,  $d=0.4$  毫米, 由此测试结果可画出此激光束的径向强度分布曲线为  $r_0=0.86$  毫米的高斯

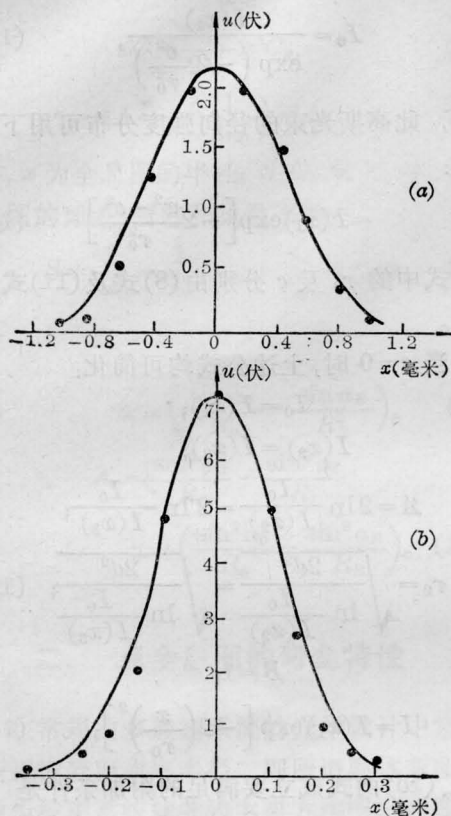
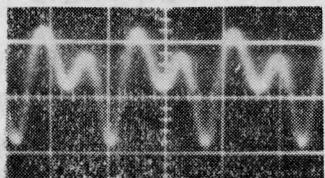
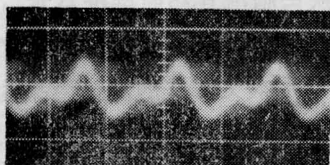


图 2

(上接第 100 页)



(a)



(b)

图 9

(调制器驱动频率:  $f=19.43$  兆赫; 0.03 微秒/格)

在本实验及其对结果的分析中曾与张光

曲线:  $I(x)=2.21 \exp(-2.7x^2)$ 。“.”点为用狭缝逐点测量的数据, 狭缝宽度 0.05 毫米, 两种方法得到的结果相当吻合。

图 2(b)为对经过聚焦物镜的聚焦激光束的测试结果:  $I(x_1)=7.3$  伏,  $I(x_2)=5.0$  伏,  $I(x_3)=4.9$  伏,  $d=0.1$  毫米。由此结果可画出  $r_0=0.227$  毫米的高斯曲线, 即在所测的截面上的径向强度分布函数为  $I(x)=7.3 \exp(-38.92x^2)$ 。图中“.”点为用狭缝逐点测量的数据, 狭缝宽度为 0.02 毫米。两种方法得到的结果吻合得也很好。上述测试结果表明, 本文所述的测量方法是正确可行的。

作者衷心感谢陆志贤、江庆五、张志萍三位同志在测试工作中所给予的帮助。

### 参 考 文 献

- [1] C. K. Rhodes, A. Szoke; In *Laser Handbook*, 1, F. T. Arecchi, E O. Schulz-DuBois, Eds, North-Holland, Amsterdam, 1972.
- [2] Y. Suzuki *et al.*; *Appl. Opt.*, 1975, **14**, No. 12, 2809.
- [3] J. E. Pearson *et al.*; *JOSA*, 1969, **59**, 1440.
- [4] R. J. Anderson, C. Larson; *Appl. Opt.*, 1971, **10**, No. 7, 1605.
- [5] LeRoy, D. Dickson; *Optical Engineering*, 1979, **18**, No. 1, 70.

寅、张春平等同志进行过有益的讨论, 李荣荣、马树昌、孔强、陈煦等同志曾参加了部分测试, 在此致以谢意。

### 参 考 文 献

- [1] F. T. Arecchi; 《非线性光学手册》, (中译本), 1978, 133.
- [2] E. C. Richardson; “Technical Aspects of Sound”, 1957, **II**.
- [3] 董孝义, 盛秋琴; 《激光》, 1982, **9**, 157.
- [4] A. Yariv; “Quantum Electronics”, Second Edition, 1975.
- [5] 刘鸿举等; 《声学学报》, 1980, No. 2, 135.
- [6] 徐介平; 《北京工业大学学报》, 1980, No. 2, 60.
- [7] DiDomenico *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1965, No. 6, 150.
- [8] 李荫远, 杨顺华; 《非线性光学》, 1974, 12.
- [9] 董孝义; 《应用激光联刊》, 1982, No. 5, 48.