

用连续波电光检测技术进行 LiNbO_3 定向耦合波导调制器的场分布测量*

朱祖华 丁 纯 丁桂兰 王硕勤
(浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310008)

提 要

本文介绍一种新颖的无损检测技术——连续波电光检测技术 (CWEOP) 对 LiNbO_3 定向耦合波导调制器模拟样品内场分布进行各种测量所获得的实验结果。采取了背射和端射两种测量方式, 测出了波导电极条下, 电极间隙区以及电极中断区电场的分布, 并对实验结果进行了讨论。

关键词: 线性电光效应; 连续波电光检测; 波导调制器。

一、引 言

连续波电光检测技术 (CWEOP) 是一种近年来刚刚起步发展起来的无损测量技术^[1]。这种技术可用于测量各种电光材料及由其所制作的器件内的电场分布情况。而且具有装置简单、测量方便、灵敏度高、重复性好等特点。近年来, 作者已经用这一技术对 GaAs 共平面波导、GaAs 定向耦合波导调制器^[2]、GaAs 光导开关^[3] 以及 LiNbO_3 定向耦合波导调制器的电场分布进行了多方位的扫描检测; 也对半绝缘 GaAs 材料表面特性进行了探测^[4], 都获得了与理论分析一致的结果。最近, 该方法又被用于调制掺杂 GaAs/AlGaAs 双异质结构二维电子气电位分布的测量^[5]。可以预计, 它将获得越来越广泛的应用。

LiNbO_3 晶体具有很大的电光系数以及很高的电阻率, 从而可以使由它所制成的调制器件具有较高的调制效率及调制带宽, 因此是最早进入光电器件领域的材料之一。尽管在新的电光材料不断涌现的今天, LiNbO_3 晶体仍在光调制器、光开关、光分路器等领域内得到广泛的应用。所以, 把 LiNbO_3 选作电光检测技术研究的对象之一是有它的实际意义的。

本文将着重介绍对 LiNbO_3 定向耦合波导调制器进行电光检测的实验结果。

二、原 理

连续波电光检测的理论基础就是电光晶体的线性电光效应^[6]。简述之, 即当在一定方向偏振的探测激光通过加了偏置电压的电光晶体时, 其偏振状态因快光与慢光之间的相移将发生变化。利用一对正交的偏振器和一个四分之一波片可以将这种由于电场引起的探测光偏振变化转变为光强度的变化。在一定的条件下, 这种光强度随外加偏置电压(或电光晶体

体内电场强度)的变化是一种线性关系。连续波电光检测就是基于这一关系。当用线偏振激光束逐点照射加了偏压的电光晶体时,由晶体反射或透射的激光束就包含了照射处晶体体内电场强弱的信息,从而知悉晶体内某一方向的场分布情况。

LiNbO₃ 晶体属三角晶系 $3m$ 点群结构,用来制作器件的 LiNbO₃ 晶体通常按晶体的三个主晶轴 x 、 y 、 z 方向切割,本文所选取的样品为 z 切割 y 向通光的波导调制器。在测试中采用了 z 向通光、 x 向扫描和 y 向通光、 x 向扫描两种方式。图 1 就是样品及测试方式的示意图。

根据 $3m$ 晶体的电光性质可知,当激光束由样品背面入射(即沿 z 方向入射)时,能对 x 方向的场分量 E_x 及 y 方向的场分量 E_y 产生响应,但对 E_z 场没有响应,即仅产生横向电光效应。这个效应所引入的相移为

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_{z'} &= \frac{2\pi L_z}{\lambda} n_0^3 \gamma_{22} E_x, \\ \Gamma_{z'} &= \frac{2\pi L_z}{\lambda} n_0^3 \gamma_{22} E_y. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 λ 为入射激光束在真空中的波长; n_0 为 LiNbO₃ 的寻常光折射率, γ_{22} 为 LiNbO₃ 的电光系数, L_z 为光所经过的晶体长度。本实验中,在应用反射光路时 $L_z = 2H$ (H 为晶体厚度),在应用透射光路时 $L_z = H$; E_x 、 E_y 分别为光束在晶体内传播时所感受的电场分量。

同样,也可以知道,当激光束由样品端面入射(即沿 y 方向入射)时,对分量 E_x 、 E_y 以及 E_z 都能产生响应。这三个响应除了对 E_y 场是纵向电光效应外,其余两个也都是横向电光效应,这些效应所引进的相移分别为

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_{y'} &= \frac{2\pi L_{y'}}{\lambda} (n_0 - n_e) + \frac{\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{22} E_x L_{y'} \neq 0, \\ \Gamma_{y'} &= \frac{2\pi L_y}{\lambda} (n_0 - n_e) + \frac{\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{22} V_y, \\ \Gamma_{y'} &= \frac{2\pi L_y}{\lambda} (n_0 - n_e) \pm \frac{\pi}{\lambda} n_0^3 \left[\left(\frac{n_e}{n_0} \right)^3 \gamma_{33} - \gamma_{13} \right] E_z L_{y'}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中的 n_e 为 LiNbO₃ 晶体的异常光折射率; γ_{33} 、 γ_{13} 是 LiNbO₃ 的电光系数,其它各符号意义与前面介绍的相同。上式中 $L_{y'}$ 为光沿感应主轴 y' 方向所经过的路径,在 E_x 场情况下,感应主轴 y' 对应于原晶体主轴 y 旋转了 45° ,所以对沿 y 方向入射的光而言, $L_{y'} \neq 0$,因此 E_x 场引起的 $\Gamma_{y'}$ 可以忽略不计,也即认为 y 向入射的光对 E_x 没有响应。而对 E_y 、 E_z 分量而言,由于感应主轴对应原晶体主轴旋转角度极小,或甚至不发生旋转,所以式中可以以 L_y 代替 $L_{y'}$,前面所提到的 z 向入射情况也是如此,以 L_z 代替了 $L_{z'}$ 。

三、实 验

根据以上分析,便可以设计具体的实验及测试系统。连续波电光检测实验装置如图 2 所

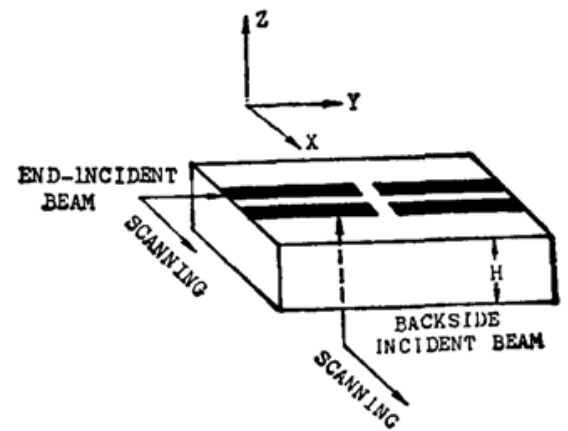


Fig. 1 Sample and probing configuration

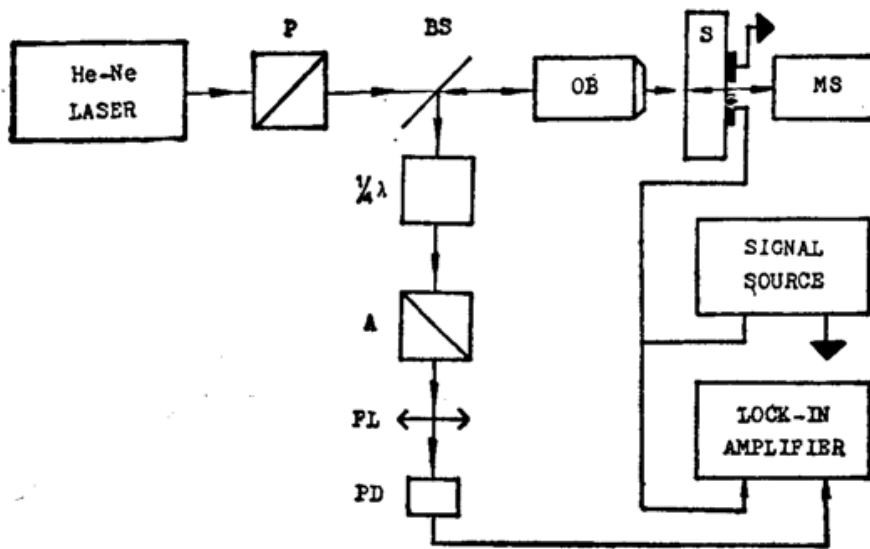


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup for CWEOP

P—polarizer, A—analyzer, BS—beamsplitter
 OB—objective, FL—focusing lens
 MS—microscope, PD—photodetector,
 S—LiNbO₃ directional coupler sample

示。调节带布氏窗的 He-Ne 激光器位置,使输出激光的偏振平行于 LiNbO₃ 晶体的 x 轴方向。线偏振光束经聚焦物镜 OB 聚焦到样品的前表面(正面),信号源在样品 S 中产生低频交变电场(频率为 10 kHz)。被前表面反射的光束由于电光效应而变为椭圆偏振光束,此光束经 $\lambda/4$ 片及偏振轴与输入线偏振光正交的检偏器 A 后被光探测器 PD 和锁相放大器接收。

本实验所采用的样品如图 1 所示,样品尺寸为 $18 \times 10 \times 2 \text{ mm}^3$,电极条宽为 $100 \mu\text{m}$,间隔为 $60 \mu\text{m}$,电极纵向间断区宽度为 $150 \mu\text{m}$ 。对四块电极加电场的方式完全模拟调制器的实际工作情况,即分平行 $//$ 和交叉 \otimes 两种状态加场,具体加法如图 3 所示。

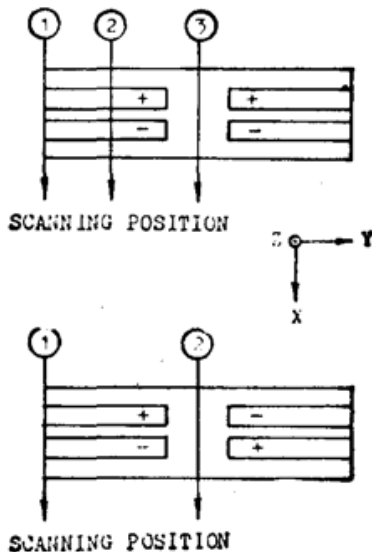


Fig. 3

(a) Bar-state condition; (b) Cross-state condition

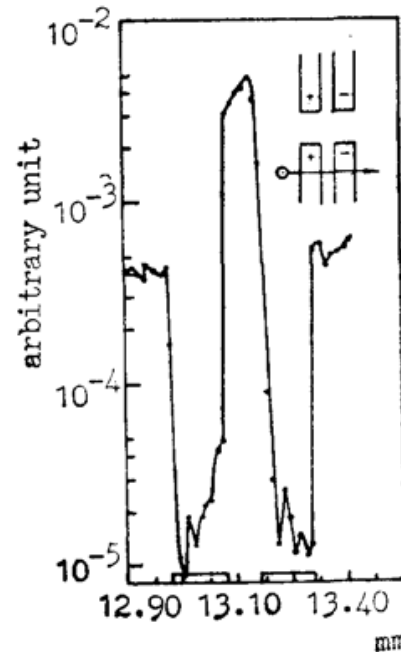


Fig. 4 Measured E-O signal under electrodes for the bar-state condition backside incidence and scanning along x axis

下面就光束由样品背面入射(z 向入射)和端面入射(y 向入射)这两种状态来介绍实验结果。

首先介绍背面入射情况。根据前面的理论分析可知, z 向传播的激光束能对 E_x 、 E_y 场分量产生响应。在平行加场情况下,当光束如图 3(a)中 ② 位置在电极下沿 x 方向逐点扫描时,由于此处基本上没有 E_y 场,所以测到的电光信号应该反映 E_x 场的分布情况。定性地看,在正、负电极之间的波导间隙区应是 E_x 场分量最大的地方,所测到的电光信号曲线如图 4 所示,正证实了这一点。这里,需要说明的是图 4 中横坐标上的两个小矩形代表波导电极位置。下面图 5 至图 9 中的表示相同。当把光束扫描位置移到电极的间断区,即图 3(a)中的 ③ 所示的扫描位置时,根据电极间断区的电力线分布情况看,应该能测到 E_x 、 E_y 两个分量。但只要样品的结构对称性足够好,扫描位置又正好处于电极间断区的中心,那么 E_y 分量很小,所以测到的主要还是 E_x 场的分布。同样,在两波导之间的中心区域应该是电力线 E_x 分量最大的地方,即 E_x 场强最大的地方。从所测得的电光信号曲线图 5 看,也和预计的情况符合得很好。

现在如果把外加电场改为交叉状态,如图 3(b)中 ② 所示,对刚才所说的电极间断区再进行一次 x 方向的扫描。在此状态下,只要扫描位置正好处在间断区的中心,则该区域所测到的信号应该以 E_y 场为主,而且两条电极各自的间断区内 E_y 场应该方向相反,检测到的电光信号曲线图 6 也完全证实了这一点。

其次介绍端面入射的情况。按理论分析, y 向传播的激光束只能对 E_y 、 E_z 场分量产生响应。当在平行场情况下,将激光束如图 3(a)① 所示紧贴样品上表面、沿 x 方向扫描时,由于这时外场所产生的 E_y 分量基本可以抵消,因此所检测到的应该是 E_z 场的分布。从电

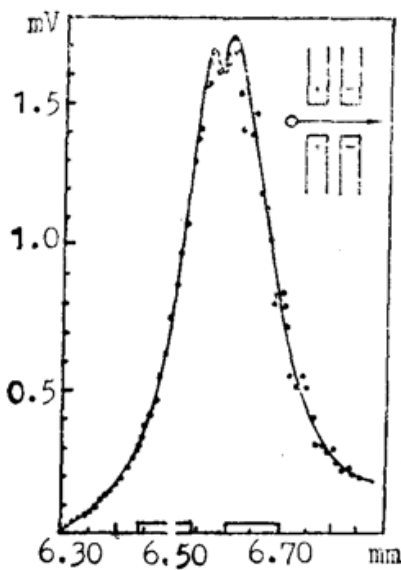


Fig. 5 Measured E-O signal over the interrupt region of electrodes for the bar-state condition, backside incidence and scanning along x axis

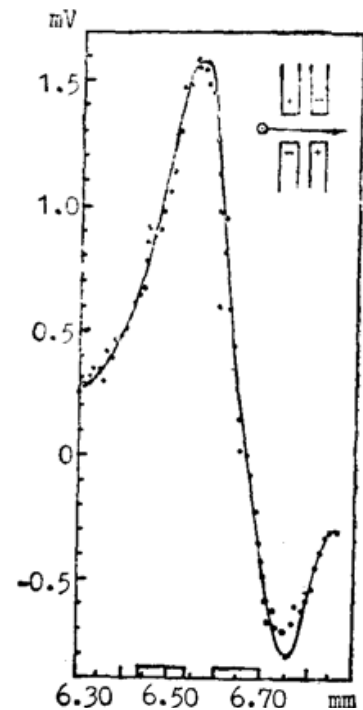


Fig. 6 Measured E-O signal over the interrupt region of electrodes for the crossstate condition, backside incidence and scanning along x axis

力线走向看,两电极下的 E_z 场应该符号相反,图7所示就是测量所得的实验曲线,与分析也基本相符。在交叉场情况下, E_z 分量的作用可以基本抵消,因此当按图3(b)①所示方式,将激光束沿 x 方向扫描时,主要应该测到 E_y 场的分布。而且从电力线走向看,两条波导电极间断区的 E_y 场方向相反,实验测得的曲线图8也基本证实了这一点。

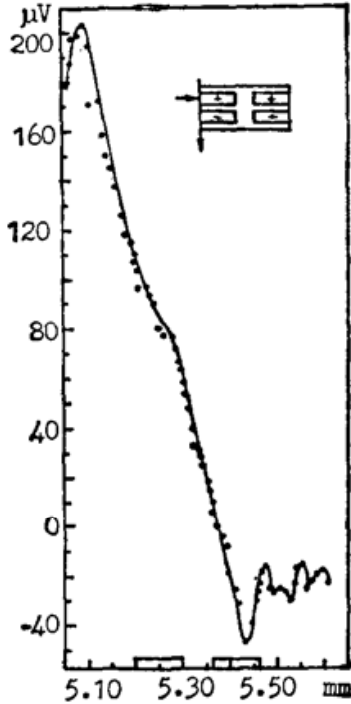


Fig. 7 Measured E-O signal for the bar-state, end-incidence and scanning along x axis

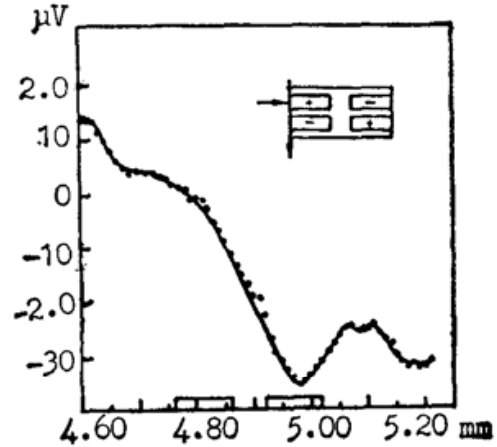


Fig. 8 Measured E-O signal for the cross-state, end-incidence and scanning along x axis

四、讨 论

实验所得的曲线在某些局部上与理论预计的有差别,作者认为这主要是由于实验误差引起的。如图6曲线,按理场分布的倒相点应该在电极间隙区的中点,但实际的测试结果却表明倒相点进入了电极区,这是因为光束在电极间断区沿 x 方向扫描时没有完全走在间断区的中心,这就使在中心线附近基本不起作用的 E_z 分量在此时参加了响应,从而使曲线变得不对称。作者曾试过,大大减小电极间断区尺寸,例如从 $150 \mu\text{m}$ 减至 $20 \mu\text{m}$ 左右,使 E_y 场增强而起主导作用,结果确实测到了倒向点正好处于电极间隙区的场分布曲线图9。此外,样品整个表面没有完全与显微物镜的焦平面重合,也是造成测试曲线对称性不好的原因之一。

端射情况的图7、图8所示曲线的对称性不好,估计也是因为扫描光束入射方向不完全平行 y 轴,扫描方向不完全平行 x 轴所造成的。因为样品长达 18 mm ,调节十分困难,所以造成结果不对称性的可能性就更大了。

产生以上种种偏差还由于所用的样品架调节精度不高、调节维数也不够所致。

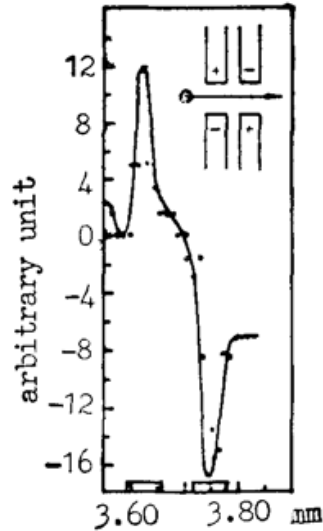


Fig. 9 Measured E-O signal with the reduced interrupt region of electrodes in Fig. 6 case

此外,从理论分析看,端射情况下,不管是 E_y 场引起的纵向效应,还是 E_x 场引起的横向效应,都受到自然双折射项($n_o - n_e$)的影响,而 LiNbO₃ 的 n_o 和 n_e 又对温度较为敏感。在测试过程中的确发现,这些情况下电光信号不太稳定,这也给实验带来了一定的误差。因此,从考虑调制器工作的稳定性出发,例如 y 切 z 向通光的结构应是可取的。

实验中,采用了尺寸较大的模拟样品进行场分布规律的测量研究,并未过于追求探测光束光斑的大小。测试中所用激光光斑大小约为 $5 \mu\text{m}$ 左右。据作者所知,对于波长 $0.6328 \mu\text{m}$ 的 He-Ne 激光而言,激光束斑做到接近 $1 \mu\text{m}$ 是可能的。这对于目前一般的实际光波导器件而言,是完全可以满足场分布测量的要求的。因而,此方法对实际器件的应用应是不成问题的。

五、结 论

对于波导调制器而言,波导的传播常数 β 及波导间的失配 $\Delta\beta$ 是与波导区电场分布直接有关的重要参量,测出波导器件的实际场分布,将给这类器件的设计和改进行提供一个有力的依据。

本文已运用连续波电光检测法成功地测出了 LiNbO₃ 定向耦合波导调制器模拟样品各个区域中场分布的变化规律,这与理论预期的结果基本相一致。可以预计,这种无损的电光探测技术,在波导器件的性能分析测试中,将会有很广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Z. H. Zhu, J.-P. Weber *et al.*; *A. P. L.*, 1986, **49**, No. 8 (Aug), 432.
- [2] 朱祖华;私人通信。
- [3] 朱祖华,丁纯等;私人通信。
- [4] Y. H. Lo, Z. H. Zhu *et al.*; *A. P. L.*, 1987, **50**, No. 17 (Apr), 1125.
- [5] P. Hendriks *et al.*; *A. P. L.*, 1989, **54**, No. 18 (May), 1763.
- [6] A. Yariv; *«Introduction to Optical Electronics»*, (3rd, Ed., New York, Hork, 1985).
朱祖华;《信息光电子学基础》。(浙江大学出版社,杭州 1990 年)。

Measurements of electric field distribution in LiNbO_3 directional coupling waveguide modulator by using continuous wave electro-optic probing technique

ZHU ZUHUA, DING CHUN, DING GUILAN AND WANG SHUOQIN

(Department of Information and Electronic Engineering Zhejiang University, Hangzhou. 310008)

(Received 2 January 1991; revised 18 March 1991)

Abstract

This paper introduces the application of OWEOP (continuous wave electro-optic probing) technique in the measurements of electric field distributions in the samples of LiNbO_3 directional coupling waveguide modulator. Two configurations of measurement—the backside incidence and the end incidence have been taken in the experiments. The curves of electric field distribution under the electrodes, and in the region between two electrodes and in the interrupt region of electrodes have been obtained. The experimental results have been discussed.

Key words: linear electro-optic effect; continuous wave electro-optic probing (OWEOP); waveguide modulator.