

## 基于激光相控阵原理的相位调制器半波电压测量方法

杨作运<sup>1,2,3</sup>,王大勇<sup>1,2,3</sup>,王云新<sup>1,2,3</sup>,戎路<sup>1,2,3</sup>,杨登才<sup>1,2,3</sup>

- (1. 北京工业大学 应用数理学院,北京 100124;
2. 北京工业大学 微纳信息光子技术研究所,北京 100124;
3. 北京市精密测控技术与仪器工程技术研究中心,北京 100124)

**摘要:**半波电压是电光相位调制器的一个重要指标,针对现有半波电压测量方法存在的测量误差大、测量装置复杂等问题,提出了基于激光相控阵光束扫描原理的半波电压测量方法。通过理论分析,得到了远场主光束的偏移量和相位调制器半波电压的关系表达式。搭建了1×2全光纤激光相控阵光路,对铌酸锂波导相位调制器的半波电压进行了实验测量,改变相位调制器的加载电压,记录多幅远场光强分布图,通过求平均值减小测量误差,而且根据远场光强分布的变化得到了相位调制特性曲线。结果表明,该方法测量装置简单,不仅可以精确地测量半波电压,还可以对相位调制线性度进行分析,具有重要的工程应用价值。

**关键词:**半波电压; 激光相控阵; 相位调制; 测量

**中图分类号:** TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)03-0906-04

## Measurement method for the half-wave voltage of phase modulator based on the principal of laser phased array

Yang Zuoyun<sup>1,2,3</sup>, Wang Dayong<sup>1,2,3</sup>, Wang Yunxin<sup>1,2,3</sup>, Rong Lu<sup>1,2,3</sup>, Yang Dengcai<sup>1,2,3</sup>

- (1. College of Applied Science, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. Institute of Information Photonics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
3. Beijing Engineering Research Center of Precision Measurement & Control Technology and Instruments, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Measuring the half-wave voltage with high accuracy and a simple setup is an important issue for the applications of the electro-optical phase modulator. A new method was proposed which was based on the principal of beam steering in the laser phased array. The relationship between the offset of central beam in far field and the half-wave voltage was formulated by theoretical analysis. The setup of the 1×2 all-fiber laser phased array system was built and the half-wave voltage of the LiNbO<sub>3</sub> waveguide phase modulator was measured. Several far-field intensity distributions with different loading voltages were recorded and the measuring error was decreased by taking average of the multiple results. What's more, the curve of phase modulation characteristic was obtained according to the multiple far-field intensity

收稿日期:2014-07-18; 修订日期:2014-08-14

基金项目:国家自然科学基金(61372061,51477028,61475011,61307010,61205010);高等学校博士学科点专项科研基金(20121103120003);北京市教育委员会科技项目(KM201310005031);北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划项目(CIT&TCD201504020);日新人才、中央支持地方专项配套项目和北京工业大学研究生科技基金(ykj-2013-10519)

作者简介:杨作运(1988-),男,硕士生,主要从事激光相控阵技术方面的研究。Email: yangzy@emails.bjut.edu.cn

导师简介:王大勇(1968-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事光学信息处理和光通信方面的研究。Email: wdyong@bjut.edu.cn

distributions. The experimental results show that the proposed method is simple with high accuracy and has important applications in engineering. Meanwhile, the phase modulation linearity can be analyzed.

**Key words:** half-wave voltage; laser phased array; phase modulation; measurement

## 0 引言

电光相位调制器利用晶体的电光效应实现光的相位调制,具有控制简便、响应快、精度高等优点,成为光通信和遥感等领域的关键器件<sup>[1-2]</sup>。半波电压作为相位调制器的一个重要技术指标,是表征电压对相位调制量影响大小的重要物理量。近年来,研究者们针对电光相位调制器件,提出了多种半波电压测量方法,如光通信模拟法、极值测量法、倍频调制法等<sup>[3-5]</sup>,这些方法虽然可以实现半波电压的测量,但在测量精度和实验装置方面还有待改进,如光通信模拟法需要将光信号转化成声音信号;极值测量法容易在极值的判断上出现误差;倍频调制法需要同时加载直流和交流信号,而且对倍频调节要求很高。除了半波电压外,相位调制线性度也是一些光电系统中关注的技术参数<sup>[6-7]</sup>。

文中提出一种基于激光相控阵光束扫描原理的相位调制器半波电压测量方法,对铌酸锂波导相位调制器进行了测试,通过改变加载在相位调制器上的直流电压信号,得到了相位调制器的相位调制特性曲线,计算出了半波电压值。该方法不仅可以实现半波电压的测量,而且还可以对相位调制线性度进行分析,具有重要的工程应用价值。

## 1 测量原理

### 1.1 铌酸锂电光相位调制器半波电压

铌酸锂晶体在外加电场作用下产生电光效应,晶体折射率发生变化。通常电光效应有两种:线性电光效应,又称泡克尔斯(Pockels)效应,介质折射率变化正比于电场强度;二次电光效应,又称克尔(Kerr)效应,介质折射率变化与电场强度的平方成正比<sup>[8]</sup>。文中所用的铌酸锂波导相位调制器是基于铌酸锂晶体的线性电光效应制作而成。通常,为了获得最大调制量,采用偏振光照射,偏振方向沿铌酸锂晶体的Z轴(光轴),传播方向沿X轴或Y轴,这样可以利用铌酸锂晶体的最大电光系数 $\gamma_{33}$ 。当一束波长为 $\lambda$ 的光

经过长为 $L$ ,厚度为 $d$ 的晶体时,如图1所示,当在厚度方向施加电场 $E$ 后,输出光的相位改变量 $\Delta\varphi$ 为:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta n_e \cdot L \quad (1)$$

式中: $\Delta n_e$ 为电光效应导致的晶体e光折射率变化,具有如下关系式:

$$\Delta n_e = \frac{V}{2d} n_e^3 \gamma_{33} \quad (2)$$

式中: $V=Ed$ 为所加电压; $n_e$ 为未加电压时铌酸锂晶体e光折射率。

半波电压指相位改变量 $\Delta\varphi$ 为 $\pi$ 时,所需要的电压,根据公式(1)和(2),半波电压 $V_\pi$ 可由下式给出:

$$V_\pi = \frac{\lambda d}{n_e^3 \gamma_{33} L} \quad (3)$$

进一步的,利用公式(2)可得到半波电压 $V_\pi$ 与相位改变量 $\Delta\varphi$ 之间有如下关系:

$$V_\pi = \frac{\pi V}{\Delta\varphi} \quad (4)$$

根据公式(4),若已知加载电压 $V$ 和对应的相位改变量,便可以计算出半波电压。

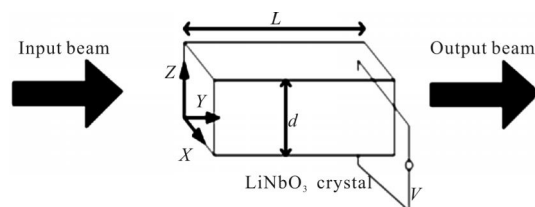


图1 铌酸锂晶体电光调制原理图

Fig.1 Schematic diagram of electro-optical modulation in LiNbO<sub>3</sub> crystal

### 1.2 激光相控阵远场光强分布

激光相控阵通过改变相干合成各光束间的相位差,可以实现远场合成主光束的扫描<sup>[9]</sup>。根据夫琅禾费衍射传播原理和复振幅叠加原理,通过孔径阵列输出的光束,在空间进行远场传播和相干合成后的复振幅可以写成如下形式<sup>[10]</sup>(考虑一维阵列):

$$U_{\text{array}}(x, y) = C \int A(x, y) \times \exp(-ikx \sin \theta_x) dx \quad (5)$$

式中: $C$ 为一常数; $k=2\pi/\lambda$ ;  $\sin \theta_x = x/z$ ;  $A(x, y)$ 为阵列孔径输出面各光束的复振幅叠加。若各相干合成光

束为高斯光束,则  $A(x, y)$  可以写成如下形式:

$$A(x, y) = \sum_{m=1}^{N_x} A_m \exp[-(\frac{x^2+y^2}{w_0^2}) + i\varphi_m] * \delta[x-md] \quad (6)$$

式中:  $N_x$  是激光相控阵中合成光束的数目;  $A_m$  和  $\varphi_m$  分别为第  $m$  个单元光束的振幅和相位;  $d$  为单元间距;  $w_0$  为高斯光束束腰半径。根据公式(5)和(6),远场合成光强为:

$$I(\theta_x, \theta_y) \propto \left| \sum_{m=1}^{N_x} A_m \exp[-i(kmd\theta_x + \varphi_m)] \right|^2 \times \exp[-\frac{1}{2}k^2\omega_0^2(\theta_x^2 + \theta_y^2)] \quad (7)$$

式中:  $\theta_x$  和  $\theta_y$  是远场参考面上点  $(x, y)$  在  $x, y$  方向的张角,这里可以分别近似为  $x/z$  和  $y/z$ 。公式(7)所描述的远场光强分布为包含中央主极大和栅瓣的干涉条纹,当  $\varphi_m$  为 0 时,即各路光束等相位,主极大位于中央位置;当利用相位调制器件连续改变  $\varphi_m$  时,干涉条纹移动,主极大位置发生改变;当相邻的  $\varphi_m$  相差为  $2\pi$  的整数倍时,主极大重新回到中央位置,从而实现激光相控阵的光束扫描。

### 1.3 半波电压测量原理

利用两路激光相控阵的光束扫描原理可以实现铌酸锂波导相位调制器的半波电压测量和相位调制线性度分析。在两路激光相控阵中,一路作为参考光,假定相位  $\varphi_1$  为 0;另一路光经加载电压为  $V$  的铌酸锂波导相位调制器,其相位  $\varphi_2$  为  $\pi V/V_\pi$ 。根据公式(7)给出了  $V=0$  和  $V \neq 0$  情况下的远场光强分布图,分别如图 2(a)、(b)所示。

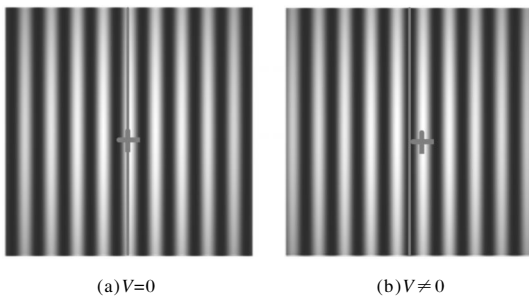


图 2 两路激光相控阵远场光强分布

Fig.2 Far-field intensity distribution of 1x2 laser phased array

图 2 中用粗实线标定了远场光强分布图的中心,用“+”标定了主极大条纹,可以看出,当施加电压后,主极大条纹发生移动,若测得条纹偏移量  $\delta$  和条纹周期  $D$ ,就可得相位调制器的相位调制量  $\Delta\varphi$  为:

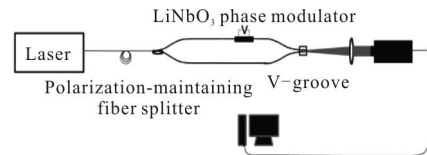
$$\Delta\varphi = \frac{\delta}{D} \times 2\pi \quad (8)$$

再根据公式(4)和已知的加载电压就可以计算得到半波电压。若取不同的电压值,测得多幅远场干涉图样,得到多组  $\Delta\varphi$  和  $V_\pi$ ,通过取平均值,可以减小测量误差;得到多组  $\Delta\varphi$  和  $V$ ,还可以对相位调制器的相位调制线性度进行分析。

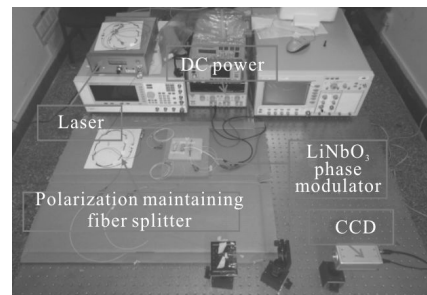
## 2 实验装置

实验方案如图 3(a)所示,光源为 1 060 nm 光纤激光器,输出光经单模保偏光纤传输,然后经保偏分束器分成两路功率相等的光,其中一路作为参考光,一路连接铌酸锂波导相位调制器。最终两个输出端尾纤排列在间距为 250  $\mu\text{m}$  的准直 V 型槽上,两路光在空间相干合成,经焦距为 150 mm 的透镜后,在后焦面上形成干涉条纹,通过可调直流信号源改变加载在铌酸锂相位调制器上的电压值,电压值从 0~10 V 连续连续缓慢地增加,用红外 CCD 实时观测条纹移动情况,CCD 的像素大小为 20  $\mu\text{m}$ 。

整体实验装置如图 3(b)所示。



(a)实验方案  
(a)Experimental scheme



(b)实验装置  
(b)Experimental setup

图 3 测试系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of the experiment system

## 3 测试结果和分析

分别记录了电压为 0 V、3 V、5 V、8 V、10 V 情况下的远场干涉图样,为了计算条纹偏移量,对每一幅

图取横截面,得到条纹亮度(灰度值)随着位置变化的曲线,条纹位置以像素数标定如图 4 所示。

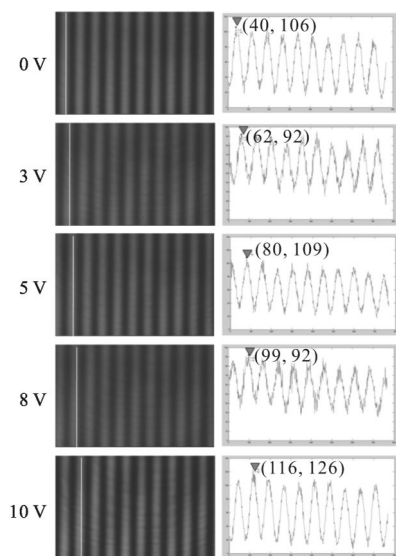


图 4 不同加载电压下远场干涉图样和横截面

Fig.4 Far-field interference patterns and cross sections when loading different voltage

从图中可以计算出条纹周期为 76, 标定条纹的位置分别为:40、62、80、99、116。根据每幅图计算出的条纹偏移量、相位调制量和半波电压,结果如表 1 所示。

表 1 测量结果

Tab.1 Test results

| V/V                   | 0 | 3    | 5    | 8    | 10   |
|-----------------------|---|------|------|------|------|
| $\delta/\text{pixel}$ | 0 | 22   | 40   | 59   | 76   |
| $\Delta\varphi/\pi$   | 0 | 0.58 | 1.05 | 1.55 | 2.00 |
| $V_\pi/V$             |   | 5.18 | 4.75 | 5.15 | 5.00 |

为了减小测量误差,半波电压取平均值,因此可以得到该波导相位调制器的半波电压为 5.02 V,与理论值基本相符。根据表 1 得到铌酸锂波导相位调制器的相位调制特性曲线如图 5 所示,用 Origin

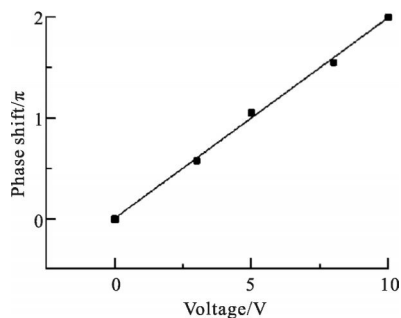


图 5 铌酸锂相位调制器相位调制特性曲线

Fig.5 Voltage-phase curve of the phase modulator

软件计算的线性拟合系数可以达到 0.99。测量结果说明该铌酸锂波导相位调制器具有较低的半波电压和较好的相位调制线性度。

## 4 结论

文中分析了激光相控阵远场光束扫描的工作机理,提出了基于激光相控阵原理的电光相位调制器半波电压测量方法。与传统的测量方法相比较,该测量装置简单,而且可以对相位调制线性度进行定量分析。近年来,随着半导体技术的不断成熟,电光相位调制器件已经取代传统的移相器,成为光纤陀螺、激光相控阵雷达等技术中的关键器件,文中提出的半波电压测量方法对推动这些技术的进步具有重要的意义。

## 参考文献:

- [1] Wooten E L, Kissa K M, Yi-Yan A, et al. A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communications systems [J]. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE*, 2000, 6(1): 69-82.
- [2] Li Yubo, Zhang Peng, Zeng Xiaoyu, et al. Remote sensing measurement by full-Stokes-vector based on opto-electronic modulator[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(2): 335-338. (in Chinese)  
李宇波, 张鹏, 曾宇晓, 等. 基于电光调制器的 Stokes 全矢量的遥感测量[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(2): 335-345.
- [3] Sun Jian, Mou Haiwei, Liu Shiqing, et al. Study on measuring half-wave voltage in electro-optic modulation[J]. *College Physics*, 2008, 27(10): 40-43. (in Chinese)  
孙鉴, 牟海维, 刘世清, 等. 电光调制中半波电压测量方法的研究[J]. *大学物理*, 2008, 27(10): 40-43.
- [4] Guo Minglei, Han Xinfeng, Zhang Maolian. Frequency doubling method for half-wave voltage measurement based on electro-optical modulation [J]. *J Appl Opt*, 2010, 31(1): 106-109. (in Chinese)  
郭明磊, 韩新风, 章毛连. 电光调制晶体半波电压倍频测量方法的讨论[J]. *应用光学*, 2010, 31(1): 106-109.
- [5] Satoshi O, Tetsuya K, Masayuki L. Measurement of chirp parameters and halfwave voltages of Mach Zehnder-type optical modulators by using a small signal operation [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2003, 15(5): 682-684.
- [6] Wang Detian, Zhou Weijun, Wen Weifeng, et al. Phase error

- analysis of the phase-lock MOPA coherent combining system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(11): 2940-2944. (in Chinese)
- 王德田, 周维军, 温伟峰, 等. 主振荡功率放大相干合成系统的相位误差分析 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(11): 2940-2944.
- [7] Huang W R, Montoya J, Kinsky J E, et al. High speed, high power one-dimensional beam steering from a 6-element optical phased array[J]. *Opt Express*, 2012, 20(16): 17311-17318.
- [8] Lan Xinju. Laser Technology [M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese)
- 蓝信钜. 激光技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [9] Yang Dengcai, Yang Zuoyun, Wang Dayong. Theoretical analysis on array of integrated optical waveguides applied in laser-phased-array system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 1997-2002. (in Chinese)
- 杨登才, 杨作运, 王大勇. 阵列集成光波导应用于光学相控阵中的理论分析 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 1997-2002.
- [10] Born M, Wolf E. Principles of Optics[M]. New York: Pergamon Press, 1980.