

# 集成光学 Mach-Zehnder 型模数转换器

沈荣桂 李宝贞 阮丽真 周炎辉 应再生  
(上海交通大学应用物理系, 上海 200030)

## 提 要

简述了M-Z干涉调制器型A/D转换器的原理, 报道了实验样品的设计参数、制备工艺和实验现象观察, 介绍了性能测试的方法和结果。

关键词 干涉调制器 A/D转换器。

## 1 引 言

模数转换器的功能是将传感器获得的连续模拟信号加以取样、量化、编码, 转换成一系列等价的数字量信息, 以便进一步进行数字处理。随着计算机的普及, 传统的模数转换器获得了广泛的使用。H. F. Taylor<sup>[1]</sup>在1975年提出用集成光学光波导调制器阵列进行A/D转换后, 光学A/D转换器就引起了人们极大的兴趣, 这方面的研究也取得了很大的进展<sup>[2]</sup>。因为光学A/D转换的特点是1) 转换速率极高, 2) 结构简单, 3) 编码器的光输出可以直接记录在移动的照相底片上, 作为永久性的记录。

在雷达、电子侦察、电子武器、频谱通讯与瞬态数据记录等信号处理领域, 以及光数字计算机中, 要求很高的转换速率( $10^9\text{s}^{-1}$ ), 这是传统的电子A/D转换器难以达到的, 只能期望于光学A/D转换器。

在集成光学中, 实现A/D转换通常有下列几种电光调制器构型, 即光波导 Mach-Zehnder 干涉调制器阵列<sup>[3]</sup>, 光波导 Fabry-Perot 调制器阵列<sup>[4]</sup>, 以及平衡桥式调制器结构<sup>[5]</sup>。本文报道第一种构型转换器的原理、制作工艺, 以及对这种结构的实验性样品进行观察、测量。

## 2 简单原理

M-Z型A/D转换器的结构如图1所示。其中作为核心的是M-Z调制器阵列, A/D转换器的每一位由一个M-Z干涉调制器组成。由于晶体( $\text{LiNbO}_3$ )的电光效应, 进入调制器两臂的光之间产生位相差, 故两臂合成后的输出光强受到加在电极上的模拟电压的调制。某一位的输出光强 $I_n$ 可表示为:

$$I_n = I_0 \cos^2(\varphi_n/2 + \psi_n/2) \quad n=1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

式中 $I_0$ 为输入光强,  $\psi_n$ 为由于两臂几何结构等因素而引起的静态位相差,  $\varphi_n$ 为由于外加电

压  $V$  引起的位相差.

$$\varphi_n = K L_n V. \tag{2}$$

式中  $L_n$  为电极的长度,  $K$  为一常数, 其决定于光波长  $\lambda$ 、电极的几何结构及晶体的电光参数.

对一定的 M-Z 干涉调制器, 使  $\varphi = \pi$  所需施加的电压称为“半波电压”, 记为  $V_\pi$ . 由式 (2) 可得:

$$V_\pi = \pi / KL. \tag{3}$$

若  $\psi = 0$ , 则当施加电压  $V_\pi$  后, 被调制的光强度为极小. 由此可知, 外加电压每变化一个  $V_\pi$  时, 光强将发生一次从极大到极小的变化.

由 (3) 式可知,  $V_\pi$  与电极长度  $L$  成反比. 显而易见, 若有一组仅电极长度成倍变化,  $L_1 = 2L_2 = 4L_3 = 8L_4$ , 其他参数不变的 M-Z 调制器组合在一起, 即能构成 A/D 转换器. 调制电极最短的 ( $L_4$ ) M-Z 调制器对应最高有效位 (MSB), 最长的 ( $L_1$ ) 对应最低有效位 (LSB).

但是在四位两进制码中, 在某些电压下易发生两位或多位同时阶跃变化, 即导致误码出现. 为了减少误码率, 往往采用 Gray 编码, 所以各位电极长度分别为  $L_1 = 2L_2 = 4L_3 = 4L_4$ , (如图 1 所示), 半波电压分别为:

$$V_{\pi 1} = \frac{1}{2} V_{\pi 2} = \frac{1}{4} V_{\pi 3} = \frac{1}{4} V_{\pi 4}.$$

图中, 左端的直流偏置电极是用来对各调制器加以一定的偏压, 以消除各位的静态位相差. 在 Gray 码中, 初位关系如下:  $\psi_1 = \psi_2 = \psi_3$ ,  $\psi_4$  与以上三者相差  $\pi/2$ . 图 2 表示了电压与调制器阵列各位输入光强的对应关系. 经比较器后, 信号被量化为“0”或“1”电平.

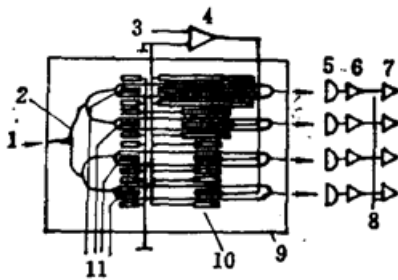


Fig. 1 Schematic diagram of a 4-bit electrooptic A/D converter with Gray-code

- 1—Laser; 2—Channel waveguide; 3—Analog input;
- 4—Amplifier; 5—APD; 6—Amplifiers; 7—Comparators;
- 8—Reference; 9—LiNbO<sub>3</sub>; 10—Electrodes;
- 11—D. C. bias

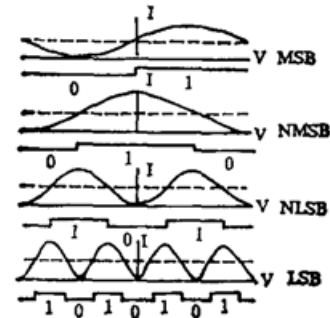


Fig. 2 Intensity versus voltage for 4-bit A/D converter with Gray-code output. The dashed lines are at the  $I_0/2$  intensity level

### 3 器件制作和性能测量

#### 3.1 器件制作

制作过程分为三步, 首先在  $\text{LiNbO}_3$  基片上制作单模条波导, 其中包括  $Y$  分叉波导的设计, 钛膜的淀积, 光刻和扩钛; 然后对波导的两端面抛光, 以便器件工作时进行激光的端面

耦合;最后,在波导上制作调制电极,其中包括铝膜的淀积、光刻和超声焊接引线。波导和电极的设计参数以及工艺制作参数,列于表1。

Table 1 The parameters of the M-Z interferometric modulator array

Substrate	Material	X-cut, Y-propagation LiNbO <sub>3</sub>
	Size	36 × 10 × 2 mm
Optical waveguide	Type	Channel, Ti-indiffused, Ti~500 Å
	Width of a channel	6 μm
	Seperation*	200 μm
Electrode	Type	Al
	Thickness	200 nm
	Width	50 μm
	Space	10 μm
	Length(mm)	$L_1=16, L_2=8, L_3=L_4=4, L_{bias}=2$

\* Seperation between adjacent output.

### 3.2 性能测量

采用如图3所示的实验装置观察和测量器件样品的转换特性、光取样、半波电压和转换带宽等参数。实验中激光的波长为  $0.78 \mu\text{m}$ , 加在调制器上待转换成数字信号的模拟信号采用三角波(由低频信号发生器提供)。

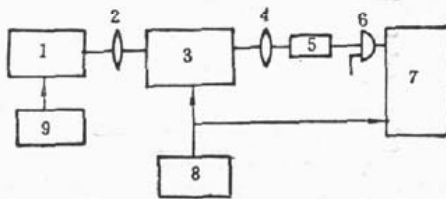


Fig. 3 The experimental setup for measuring the performance of the 4-bit A/D converter.

1—Laser; 2, 4—Lens; 3—Sample; 5—Multiplier phototube; 6—Comparator; 7—Oscilloscope; 8—R. F. signal source; 9—Pulse generator

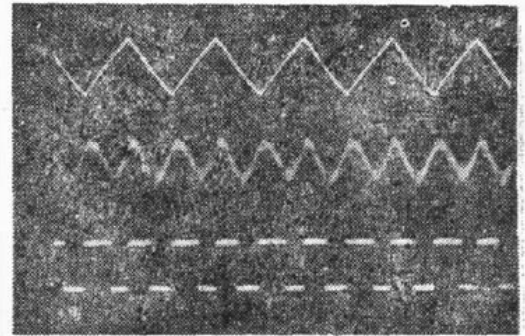


Fig. 4 Response to a ramp analog test signal of a bit channel of an electrooptic A/D converter

图4是连续激光输入时该转换器中某一位对模拟信号响应的示波器照片。上部是输入的模拟信号;中间是探测器光电倍增管的输出;下部是探测器的输出信号与比较器的参考信号(即参考电平)比较后的“0”、“1”量化信号。在示波器上,根据模拟信号的大小和对应的输出信号的变化可以测出半波电压。

图5是显示光取样的照片。半导体激光器经电脉冲信号直接调制,发出脉冲激光,当脉冲激光耦合入光波导后,在光电倍增管上就得到一个输出光脉冲。图中上部同样是模拟

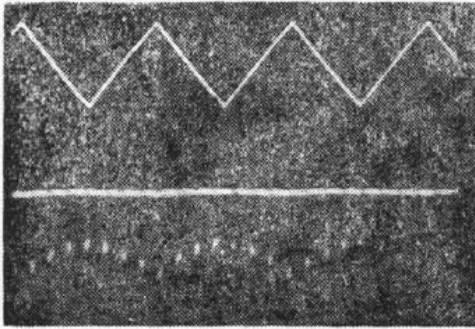


Fig. 5 The oscillogram of optical sampling in pulsed laser. Response to a ramp analog test signal of a channel

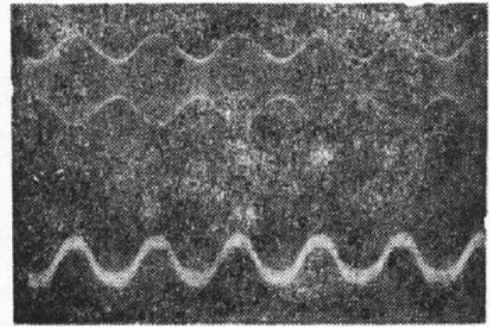


Fig. 6 Bandwidth testing of an A/D converter

信号——三角波；中间一条间断的直线是无光信号时探测器输出的基线，而下面由一点点组成的曲线是对应输入光脉冲经调制后的探测器输出。比起电子 A/D 转换器，光学 A/D 转换器的取样就显得简单方便多了，不仅省去了取样和取样保持电路，而且避免了取样时产生的信号畸变。

实验时用光电倍增管作为探测器测量转换器的频响特性，存在光电倍增管对高频信号截止的问题，本文采用简化的 S. Uehara“扫频技术法”<sup>[6]</sup> 测试样品的频率响应和 3 dB 带宽时，用低频信号 (1 kHz) 调制输入的高频信号，即在图 3 所示的测试设备中，模拟信号源采用超高频信号发生器 XG-13，代替低频信号发生器 XFD-8A。在测试过程中，逐点改变高频信号的频率，而低频调制信号的频率固定，幅度也控制在一定值，这样光电倍增管就能接收到随着输入的模拟信号幅度（即低频调制包络）变化而变化的输出光强。图 6 上部所示的就是施加到电极上的被 1 kHz 低频调制的 100 MHz 高频信号，下部是光电倍增管对应于光强变化的输出。逐点改变模拟信号的频率，记下探测器输出信号的大小，经归一化处理后就得出该样品的 3 dB 带宽。

本文还测试了 M-Z 调制器阵列集成光路的总插入损耗。以上几个参数的测量结果如下：

- 1) 半波电压： $V_{\pi_1} = 5 \text{ V}$ ,  $V_{\pi_2} = 10 \text{ V}$ ,  $V_{\pi_3} = V_{\pi_4} = 20 \text{ V}$ 。
- 2) 3 dB 带宽不小于 100 MHz。
- 3) 集成光路总插入损耗小于 30 dB。

## 4 结 论

光学模数转换器具有电子模数转换器难以获得的指标，它的转换速率（工作带宽）极高，并且具有集成光学器件固有的一些特点，结构紧凑，可靠性高，便于与光源、探测器等集成于同一基片上，所以在高速数字信号处理领域有着极广泛的应用前景。

本文报道的实验性 M-Z 干涉调制器型 A/D 转换器已经获得了带宽不小于 100 MHz，转换精度四位，最低有效位的半波电压 5 V，集成光路总插入损耗小于 30 dB 的结果。

虽然四位 M-Z A/D 转换器中存在 11 个 Y 分叉，但是对 Y 分叉合理设计和波导端面

的精细抛光,仍可使总插入损耗小于 30 dB. 不过比起 F-P A/D 转换器,损耗仍显得大,并且这种结构先天地决定了电极的静电容偏大,限制转换带宽的提高. 在目前工艺条件下, M-Z 构型与 F-P 构型相比仍有不少可取之处,例如,调制度高,制作难度低. 随着光学加工水平的提高(LiNbO<sub>3</sub> 端面的 F-P 制备), F-P 型 A/D 转换器也许是更理想的一种构型.

### 参 考 文 献

- [1] H. F. Taylor, *Proc. of IEEE*, 1975, **63** (10): 1524~1525
- [2] R. A. Becker *et al.*, *Proc. of IEEE*, 1984, **72** (7): 802~819
- [3] F. J. Leonberger *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **40** (7): 565~568
- [4] C. L. Chang, C. S. Tsai, *Appl. Phys. Lett.*, 1983, **43** (1): 22~24
- [5] S. Yamada *et al.*, *Electron. Lett.*, 1981, **17** (2): 259~260
- [6] S. Uehara, *Appl. Opt.*, 1978, **17** (1): 68

## Integrated optic Mach-Zehnder analog-to-digital converter

SHEN RONGGUI, LI BAOZHEN RUAN LIZHEN ZHOU YANHUI YIN ZAISHENG

(Department of Applied Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

(Received 17 June 1991; revised 13 September 1991)

### Abstract

In this paper, the principles of the analog-to-digital (A/D) converter which consists of an array of Mach-Zehnder interferometric modulators are described. The design parameters, fabrication procedure and experimental phenomena of the experimental model are reported. The measurement method and results of this model's performance are presented.

**Key words** interferometric modulator, A/D converter.