

光调制平衡电光检测^{*}

陈占国 贾 刚 李兆桂 葛元庆 衣茂斌

(吉林大学电子工程系, 长春 130023)

摘要: 介绍了一种新的电光检测方法, 即光调制平衡电光检测技术. 它通过调制探测光信号, 利用差分平衡, 实现对样品电场的锁相检测. 这种方法不调制被测电信号, 可彻底消除对被测电场的影响, 而且方法简单, 便于操作. 介绍了光调制平衡电光检测系统及检测原理, 以 GaP 为样品, 对静态电场进行了模拟测量. 将此方法应用于电光取样技术, 测量了 GaAs 共面波导在频率为 3GHz 下的微波信号.

关键词: 电光检测; 光调制

PACC: 4260K; 4280W; 7820J; 7847

中图分类号: O485 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2000)09-0922-05

Modulating Probe Beam Balanced Electro-Optic Detection^{*}

CHEN Zhan-guo, JIA Gang, LI Zhao-gui, GE Yuan-qing and YI Mao-bin

(Department of Electronic Engineering, Jilin University, Changchun 130023, China)

Received 13 July 1999, revised manuscript received 30 October 1999

Abstract: A new method of electro-optic detection—Modulating Probe Beam Balanced Electro-Optic Detection (MPBBEOD) is introduced. In this method, the electric field of samples is measured by modulating the probe beam and using the differential-balanced detection. Because the measured electric signal has not been modulated, the effect on the measured electric field can be eliminated thoroughly by using the method. Furthermore, it is very simple and easy-to-use. The configuration and theory of MPBBEOD are presented. Taking GaP as sample, its static electric field is measured. Besides, applying the method to the electro-optic sampling technique, a 3GHz microwave signal on the GaAs coplanar waveguides is measured.

^{*} 国家自然科学基金资助项目, 批准号 69676025 [Project Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 69676052)].

陈占国 1972 年出生, 理学硕士, 现在吉林大学电子工程系攻读博士学位 [CHEN Zhan-guo, born in 1972, is trying for a Ph. D. in Jilin University, China].

贾 刚 1945 年出生, 教授, 博士生导师, 现在吉林大学电子工程系工作 [JIA Gang, born in 1945, professor, tutor of Doctor postgraduate, is working in Department of Electronic Engineering, Jilin University, China].

1999-07-13 收到, 1999-10-30 定稿

Key words: electro-optic detection; optical modulation

PACC: 4260K; 4280W; 7820J; 7847

Article ID: 0253-4177(2000)09-0922-05

1 引言

用于测量超快电信号的电光取样技术是八十年代兴起的^[1-3],它具有无损伤、抗干扰、时间分辨率高、可实现在片检测等特点,因而在高速光电器件和电子器件的检测中得到广泛应用^[4-8].

人们在电光检测系统中为了取样和锁相检测的需要,一般都采用低频调制被测电信号的方法来实现^[9-11].然而,要实现对电路和信号的真正无干扰检测,对被测电路和被测电信号进行调制是不理想的.尤其对一些复杂的数字集成电路,根本就不能进行调制^[12].因为数字信号只有分别用高、低电平代表的“1”、“0”两个状态,任何复杂的信号都由这两个状态组成,而且数字电路的信号瞬时状态常常和该信号的历史状态有关.如果我们对被测的数字信号进行调制,则很可能因为信号历史条件的改变而造成高、低电平的转化,从而造成信号状态紊乱,即引起乱码.为此,我们提出了一种新的调制方法,即调制用于检测的光信号,这样一来,真正消除了对被测电路和被测信号的影响,并且,检测的范围也扩大了.它既可以检测动态电信号,还可以检测静态和准静态电信号.虽然此前也有人为了消除对被测电信号的影响而采用了延迟调制探测光脉冲的方法^[12],但设备比较复杂.本文提出的调制方法十分简单,只需在探测光路中加入一个光开关(例如斩光器、电光调制器等),周期性地控制光路的通断或改变探测光的光强即可.由于采用了平衡检测,平衡掉了与被测电信号无关的信号成分,同时减小了光源起伏、背景光等引起的共模噪声,提高了信噪比,改善了系统灵敏度.

本文采用斩光器调制探测光,建立了透射式光调制平衡电光检测系统和反射式光调制平衡电光取样系统,并分别测量了直流信号和微波信号,通过实验验证了系统的实用性和可靠性,分析了检测过程中的影响因素.

2 实验系统及原理

测试系统如图1所示: He-Ne 激光器发出 632.8nm 的红光,偏振器 1 是用来稳定 He-Ne 激光器偏振状态的.调制器为频率 $f = 140\text{Hz}$ 的斩波扇.斩波扇切割探测光束,周期性地控制探测光路的通断.偏振器

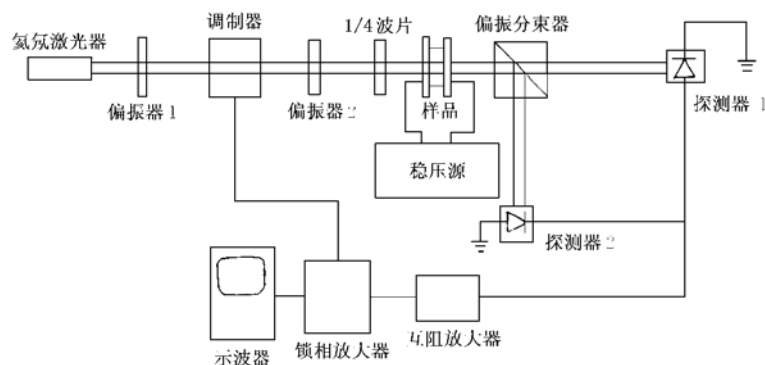


图1 透射式光调制平衡电光检测系统结构

FIG. 1 Structure Frame of Transmissive Type Optical Modulating
Balanced Electro-Optical Detection System

2 与四分之一波片、GaP 样品以及分束比为 0.5:0.5 的偏振分束器(PBS) 构成了电光振幅调制器, 样品未加电压时, 到达偏振分束器的光为圆偏振光, 从 PBS 出射的两光束光强相等, 即:

$$I_{01} = I_{02} = \frac{1}{2} m I_i \quad (1)$$

其中 I_i 为入射光强; m 为调制器的调制因子. 在本系统中, 调制器是调制频率为 140Hz 的斩波扇, 因此, m 可以表示为:

$$m = \begin{cases} 0 & \text{当光束被斩波扇遮住时} \\ 1 & \text{当光束未被斩波扇遮住时} \end{cases} \quad (2)$$

经性能相同的两 PIN 光电二极管接收, 转化为方向相反、大小相等的交变光电流(其频率 $f = 140\text{Hz}$), 即:

$$i_1 = i_2 = \frac{1}{4} a e m I_i \quad (3)$$

式中 a 为两光电二极管的响应率; e 为单位电荷的电量. 在进入互阻放大器时, 二者叠加的结果, 没有净电流流入放大器, 因而锁相放大器输出为零. 当样品加上电压时, 由于 GaP 样品的线性电光效应, 原来的圆偏振光变为椭圆偏振光, 这时, 从 PBS 出射的两光束光强不再相等, 即:

$$I_{01} = \frac{1}{2} m I_i \left[1 + \frac{\pi V}{V_\pi} \right] \quad (4)$$

$$I_{02} = \frac{1}{2} m I_i \left[1 - \frac{\pi V}{V_\pi} \right] \quad (5)$$

式中 V 为加在样品两端的电压; V_π 为样品的半波电压, 这里 $V \ll V_\pi$. 两 PIN 光电二极管产生的光生交变电流也不再相等, 流入互阻放大器的净电流将为二者之差, 为电光信号. 即流入互阻放大器的总电流为:

$$\Delta i = i_1 - i_2 = \frac{1}{2} m e a I_i \frac{\pi V}{V_\pi} \quad (6)$$

从互阻放大器输出的电压为:

$$V_o = \Delta i R_f = \frac{1}{2} R_f m e a I_i \frac{\pi V}{V_\pi} \quad (7)$$

其中 R_f 为互阻放大器的反馈电阻. 再通过锁相放大器相敏检测, 即可测出其值大小, 波形可用存储示波器进行观察.

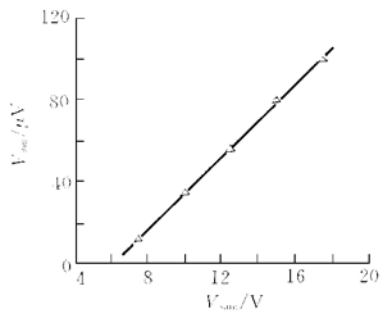


图 2 直流电场的测量曲线

FIG. 2 Measurement Curve of Direct Current Electric Field

3 实验结果及讨论

3.1 直流电场的测量

应用以上系统, 以 GaP 为样品, 通过改变加在样品两端的静态电压 V_{sam} , 依次测定锁相放大器输出的电光信号 V_{sig} , 它们之间有很好的线性关系. 如图 2 所示. 但此直线未过原点, 这说明系统平衡不理想. 实验中, 两路光束的光强可通过光强衰减器调整后达到平衡. 系统的不平衡主要来源于两个方面:

(1) 衍射效应的影响

实验中, 我们首先让斩波扇不工作. 这时努力调整两路光束的光强和探测器, 使系统处于平衡状态, 示波器输出为一条幅度为零的水平直线. 然后我们再让斩波扇工作, 这时示波器输出不再是一条直线, 出现了一系列小尖峰, 如图 3 所示. 小尖峰的频率与斩波扇工作频率一致, 且其形状与斩波扇的方位有关. 我们通过观察发现: 斩波扇的叶片切割光束时, 处于扇影中的光斑似乎在左右摆动. 事实上, 光源的位置并未动, 而是叶片切割光束时发生了直边衍射, 其效果相当于使光束左右偏移了, 从而导致系统失去了原有平衡. 由于尖峰的频率、相位与电光信号的一致, 因此其幅值将引入到测量结果中, 造成测量误差. 估计它在本实验中对测量结果的影响约为 $40\mu\text{V}$ 左右. 这从反面证明了系统的灵敏度很高, 因为以往

人们应用斩波扇时没有探测到或者可以忽略衍射的影响. 如果我们用电光调制器代替斩波扇作光开关, 可以消除衍射的影响, 提高系统的电压灵敏度.

(2) 探测器性能不一致

两个探测器的性能并不完全相同, 当 $V \ll V_\pi$ 时, 设两个探测器的响应率分别为 a_1 和 a_2 , 则两个探测器流出的光电流分别为:

$$i_1 = \frac{1}{4} a_1 m e I_i \left[1 + \pi \frac{V}{V_\pi} \right] \quad (8)$$

$$i_2 = \frac{1}{4} a_2 m e I_i \left[1 - \pi \frac{V}{V_\pi} \right] \quad (9)$$

设 $a_1 = a_2 + \Delta$, 则流入放大器的总电流为:

$$\Delta i = i_1 - i_2 = \frac{\Delta}{4} m e I_i + \frac{1}{4} m e (2a_2 + \Delta) \pi \frac{V}{V_\pi} I_i \quad (10)$$

因此, 互阻放大器输出的电压为:

$$V_o = \Delta i R_f = \frac{\Delta}{4} m e I_i R_f + \frac{1}{4} m e (2a_2 + \Delta) \pi \frac{V}{V_\pi} I_i R_f \quad (11)$$

当 $\Delta \neq 0$ 时, 将在 V_{sig} 轴上产生截距. 实验中, 我们先用同一探测器分别探测从偏振分束器出射的两路光信号, 并调整光路, 使两路光信号强度相同. 然后再用性能相近的两个探测器同时接收两路光信号, 这样我们可以通过示波器的读数估算探测器性能不同对测量结果的影响大小. 在本实验中, 此影响大小约为 $10\mu V$ 左右. 实验中, 我们希望 Δ 的值越小越好, 即希望两个探测器的性能最好相同. 这样我们就能最大限度地抑制共模噪声, 甚至突破散粒噪声的极限^[13], 从而提高系统的电压灵敏度.

3.2 微波信号的测量

在以上系统的基础上, 我们构造了反射式非共轴光电取样系统, 如图 4 所示. 微波信号源输出的微波信号分为两路, 一路用于驱动半导体激光器, 实现增益开关, 产生脉宽为 20ps 以下、波长为 $1.3\mu m$ 的超短

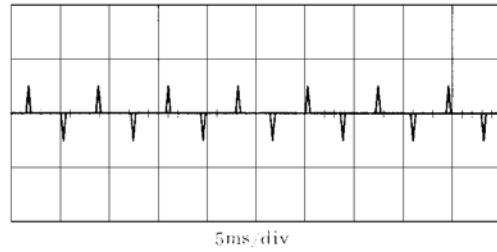


图 3 由斩波扇直边衍射引起的小尖峰
FIG. 3 Little Sharp Peaks Caused by Straight Side Diffraction of Cut Wave Fan

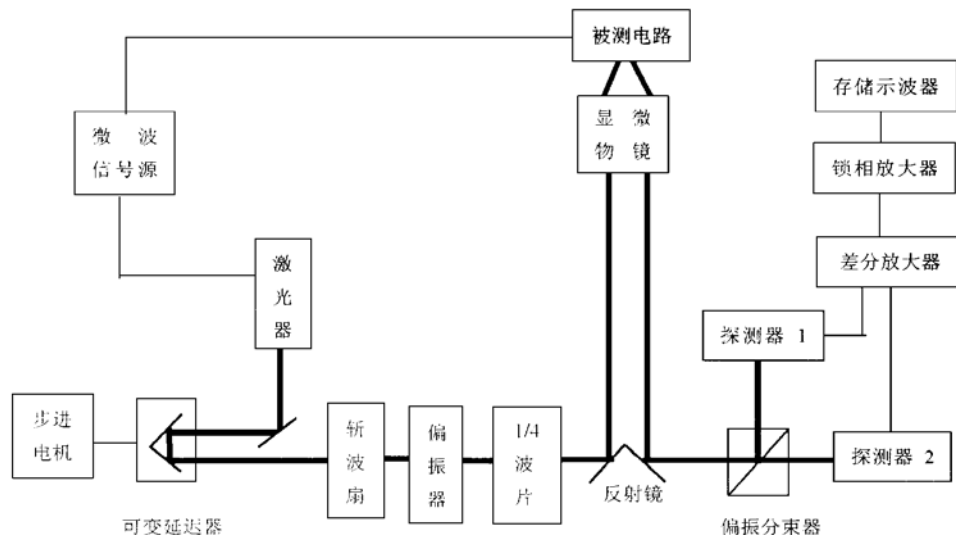


图 4 非共轴反射式光调制平衡光电检测系统

FIG. 4 System Frame of Optical Modulating Balanced Electro-Optical Detection with Uncoaxial Reflective Type

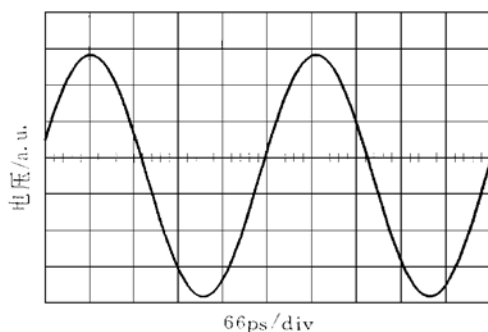


图5 GaAs 共面波导上测得的 3GHz 微波信号
FIG. 5 Microwave Signal Tested at GaAs
Coplanar Waveguide

光脉冲, 做为取样光脉冲. 其重复率与微波信号频率一致, 在本实验中为 3GHz. 另一路驱动待测的微波器件. 本实验中的微波器件是 GaAs 共面波导. 这里, 我们是采用时序变换取样来测量微波信号的, 所需的时间延迟是通过移动反射镜来改变光程的办法实现的. 测得的微波信号如图 5 所示. 信号波形的总体在幅度轴上平移了若干单位, 这是由斩波扇的衍射和探测器性能的失配引起的. 但信号波形的总体变化规律与用取样示波器观察到的一致. 该系统的时间分辨率主要由取样光脉冲的脉宽决定, 优于 20ps. 其空间分辨率主要由被测点处的探测光斑尺寸决定, 经显微物镜聚焦后, 探测光斑尺寸在 $3\mu\text{m}$ 以下. 系统的电压灵敏度还比较低, 有待进一步提

高.

4 结论

以上, 我们通过用光开关调制探测光信号的办法, 对以 GaP 为样品的直流电场和以 GaAs 共面波导为样品的微波信号分别进行了测量, 证实了这种调制方法的可行性. 由于只对探测光进行调制, 因而克服了以往调制被测电信号的不足, 彻底消除了对被测电信号的影响, 真正做到了无干扰检测. 并且此方法十分简单, 易于操作, 适用于任何电路的电光检测.

参 考 文 献

- [1] J. A. Valdmanis *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1982, **44**: 211—212.
- [2] K. J. Weingarten *et al.*, Electron. Lett., 1985, **21**: 765—766.
- [3] J. Nees and G. Mourou, Electron. Lett., 1986, **22**(17): 918—919.
- [4] D. L. Quang *et al.*, Electron. Lett., 1993, **29**(5): 498—499.
- [5] T. Nagatsuma and M. Shinagawa, Electron. Lett., 1991, **27**(21): 1904—1905.
- [6] H. K. Heinrich *et al.*, Microelectronic Engineering, 1992, **16**: 313—324.
- [7] Naofumi Shimizu *et al.*, IEEE Electron Device Letters, 1995, **16**(6): 262—264.
- [8] Richard Tokuo Sahara *et al.*, IEEE J. Quantum Electron., 1995, **31**(1): 120—125.
- [9] A. J. Taylor *et al.*, Electron. Lett., 1986, **22**: 325—327.
- [10] 苏小元, 朱祖华, 半导体学报, 1997, **18**(5): 350—355. [SU Xiaoyuan and ZHU Zuhua, Chinese Journal Semiconductors, 1997, **18**(5): 350—355(in Chinese)].
- [11] 田小建, 衣茂斌, 等, 半导体学报, 1998, **19**(7): 528—531. [TIAN Xiaojian, YI Maobin *et al.*, Chinese Journal Semiconductors 1998, **19**(7): 528—531(in Chinese)].
- [12] Kees de Kort and Joris J. Vreken, Microelectronic Engineering, 1992, **16**: 341—348.
- [13] R. A. Marsland, Laser Focus World, 1994, **3**: 441—445.