

GaP 直接电光调制特性研究*

张大明 田小建 张佰军 衣茂斌

(集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区 长春 130023)

摘要 对淡黄色透明电光晶体 GaP 衬底上的共面波导进行了直接电光调制测量, 获得了 GaP 的输入电压与电光调制输出的线性曲线和 $26\text{mV} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ 的电压灵敏度, 并与 GaAs 直接电光调制特性相对比, 分析了 GaP 直接电光调制的输出特性

PACC: 7820J, 4280

1 引言

高速光电器件和微波集成电路(MMIC's)的迅速发展, 要求测试系统的时间分辨率高, 频带宽和干扰小. 电光采样^[1,2]技术是近年来发展起来的一种具有应用价值的测量技术, 它利用电光晶体的 Pockel's 效应, 用超短光脉冲作为采样脉冲实现对快速电信号的波形测量. 早期的电光采样技术是内电光采样(即衬底内部电光采样, 又称为直接电光采样), 它具有一定的局限性, 要求被测器件的衬底为电光晶体^[3,4]. 内电光采样需要对被测器件衬底的表面进行光学处理, 而且它不能测量非电光晶体(如 Si)为衬底的集成电路, 因此在应用方面有局限性. 外电光采样是用电光晶体制成微小的电光探头, 使电光探头接近^[5-7]或放在^[8]被测器件表面, “浸”在被测器件的电场中, 从而能够测出该处电场, 因而它可对任意衬底的二维未封装集成电路器件内部任意节点的动态特性进行无触点检测. 作为外电光采样的材料有 LiTaO_3 , LiBaO_3 ^[5] 系列和 GaAs ^[6,7,9], AlGaAs ^[8] 系列等, 前者的透光区虽在可见光区但其介电常数大, 对被测点电场的影响大; 后者的介电常数虽小但透光波长又在红外区, 给观察和调试带来一定的不便. 我们采用 GaP 电光晶体做为电场传感器, 因为 GaP 的透明波长上限为 550nm, 在可见光区, 而且它与 GaAs 具有相同的对称性, 介电常数又比 GaAs 小, 所以 GaP 可以在可见光范围内对被测器件进行测量. 用电光调制测量系统对 GaP 进行了交流信号的直接电光调制测量实验, 获得了良好的 GaP 输入电压与电光调制输出的线性关系, 并与 GaAs 的直接电光调制特性相对比, 分析了 GaP 直接电光调制的输出特性

* 博士点基金资助项目

张大明 男, 博士研究生, 从事专业: 半导体光电子学
1997-08-03 收到, 1998-01-12 定稿

2 样品制备与电光调制系统

我们用光刻和蒸发的方法在双面抛光并沿 100 方向切割的 n 型 GaP (掺 S, 杂质浓度为 $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$) 晶体上制做了共面波导(CPW), 其结构如图 1 所示 图中, 中心导体电极条宽为 $100 \mu\text{m}$, 距两侧地线为 $80 \mu\text{m}$, 导体电极厚度为 $0.1 \mu\text{m}$. 这种结构尺寸保证了当 GaP 的相对介电常数为 $10^{[10]}$ 时, 它的微波等效阻抗为 50 欧姆^[11].

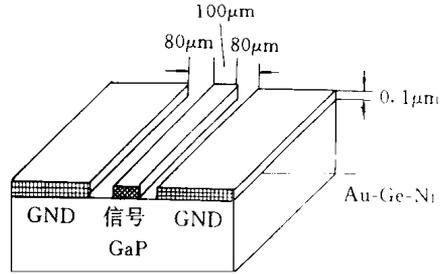


图 1 GaP 晶体 CPW 结构图

用直接电光调制装置对 GaP 衬底上的这种 CPW 结构进行了电光调制测量, 其实验原理结构如图 2 所示 图 2 中由信号源发出的正弦信号通过微波探针加到 GaP 共面波导上, 共面波导的输出接到 HP54503A

数字存储示波器上 激光器输出连续光, 通过棱镜起偏器和 1/4 波片, 将入射的线偏振光转换为圆偏振光, 然后用聚焦透镜将光束透过 GaP 衬底聚焦到共面波导的下表面上 当共面波导线通过电信号时, GaP 晶体在电场作用下发生双折射变化, 使圆偏振的入射光变为椭圆偏振光, 由 GaP 波导线反射回来的调制光束, 经过检偏器检测椭圆偏振程度, 然后用“慢”探测器和精密锁相放大器接收放大光电信号, 用存储示波器对波形进行分析比较和存储 在测试系统中使用的激光器阈值是 23mA, 波长为 $1.3 \mu\text{m}$ 的 InGaAs sP/InP 掩埋新月形大功率激光器

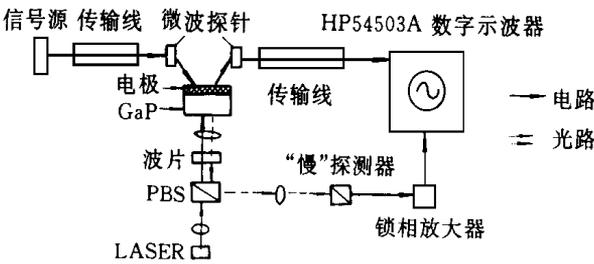


图 2 GaP 电光调制系统原理框图

3 实验结果及分析

3.1 GaP 线性电光特性的测量

用 GaP 直接电光调制测量系统, 测量了 GaP 衬底上共面波导的输入电压与输出信号的关系曲线, 如图 3(a) 所示 这里的输出信号指的是被调制光经过探测器进入锁相放大器进行前置放大后由存储示波器所获得的信号电压值 从图中可以看出, GaAs 和 GaP 的实际测量值中, 输入电压与输出信号之间呈良好的线性关系 图中 GaAs 的输入调制电压与输出信号拟合直线的斜率为 6.1×10^{-3} , GaP 拟合直线的斜率为 3.1×10^{-3} , 二者相差约两倍 理论上, 在相同条件下, 二者的输出信号幅度之比应是二者的半波电压之比(见本文第 4 部分(2)式), 约为 1.8, 而实际为 2.0, 可见测量结果与理论符合得较好.

3.2 交流调制测试

我们在 1kHz 的交流信号下对 GaP 进行了直接电光调制测量, 实测的波形如图 3(b) 所示 该波形是在输入调制电压有效值为 5V 时 GaP 和 GaAs 的输出曲线 从图中可以看出, GaAs 电光信号的输出幅度是 GaP 电光信号输出幅度的 2.0 倍左右且与 GaAs 的测量波形相差 180° 幅度之比与图 3(a) 的线性幅度之比符合得很好. GaP 的输出特性在本文第 4 部分讨论

从图 3(b)中还可以看出, GaAs 和 GaP 的线性电光输出相对于输入调制信号有大约几十微秒的时间延迟 这是在调制输出光路和电路的所有延迟时间总和, 其中主要是由探测器的响应时间决定的

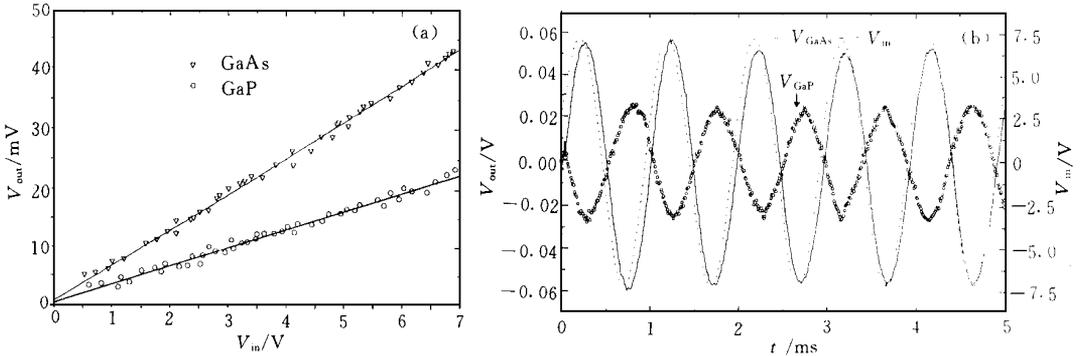


图 3 GaP 和 GaAs 电光调制特性曲线

(a) GaP 和 GaAs 输入电压与电光调制输出的线性曲线, (b) GaP 和 GaAs 1kHz 电光调制输出波形, 和▽为实验测试点, 实线是测试点的线性拟合

3.3 电压灵敏度

测试系统的电压灵敏度是指被测信号与系统的噪声信号相等时可探测的电压值, 即最小可探测电压, 实验时我们通过测量 1kHz 信号来确定 GaP 直接电光调制系统测量的电压灵敏度 用存储示波器监测待测信号的大小, 当信号的峰-峰电压值为 75mV 时, 电光调制测量信号的信噪比约为 1, 由于噪声电压与信号探测带宽的平方根成正比, 测量时锁相放大器信号接收单元的噪声等效带宽为 8.3Hz, 从而确定的电压灵敏度为 $26\text{mV} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$.

对于建立的 GaP 直接电光调制测量系统, 由于 CPW 结构中衬底的电场扩展深度接近于信号导体与地线之间的距离^[12], 因此 CPW 中心导体上的电势基本上都对调制有贡献, 所以, 要提高探测灵敏度, 一是使用更大功率的激光器来提高入射光强; 再者是在 GaP 晶体的入射面镀增透膜, 减少入射光的反射损失

4 GaP 直接调制输出波形分析

对于 $\bar{4}3m$ 对称性电光晶体的线性电光调制, 由通常的推导方法并采用与该推导过程同样的坐标系和调制方法^[10], 对于 GaAs 和 GaP, 其透射比均为:

$$\frac{I_o}{I_i} = \sin^2\left(\frac{\Gamma}{2}\right) = \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{V}{V_\pi}\right) \tag{1}$$

式中 I_o 为输出光强度; I_i 为输入光强度; $\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 \gamma_{41} V = \pi \frac{V}{V_\pi}$ 为相位延迟; $V_\pi = \frac{\lambda}{2n_o^3 \gamma_{41}}$ 为半波电压; λ 为光波长; n_o 为折射率; γ_{41} 为线性电光系数; $V = V_m \sin(\omega t)$ 为调制电压, 其中 V_m 为调制电压振幅; ω 为调制电压角频率 当在光路中加入 $1/4$ 波片后, 在快慢轴之间引入 $\frac{\pi}{2}$ 固定位相差, 使电光调制工作在线性区, 当 $V \ll V_\pi$ 时, 有

$$\frac{I_o}{I_i} \cong \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\pi V}{V_\pi}\right) \tag{2}$$

对于 GaAs, $n_o = 3.43$, $\gamma_{41} = 1.43 \times 10^{-12} \text{m/V}$ ^[10], $\lambda = 1.3\mu\text{m}$, 故 $V_\pi = 11\text{kV} > 0$, 所以随着调制

电压 V 的增加, I_o/I_i 增加; V 减小, I_o/I_i 减小; I_o/I_i 与 V 呈同相关系, 如图 4 中虚正弦曲线所示 对于 GaP, $n_o=3.10$, $\chi_{41}=-1.10 \times 10^{-12} \text{m/V}^{[10]}$, $\lambda=1.3\mu\text{m}$, 故 $V\pi=-20\text{kV}<0$, 所以随着调制电压 V 的增加, I_o/I_i 减小; V 减小, I_o/I_i 增加; I_o/I_i 与 V 呈反相关系, 如图 4 中实正弦曲线所示 由式 (2) 和图 4 可以很好地解释图 3 (b) 中 GaP 的调制波形为倒相的事实

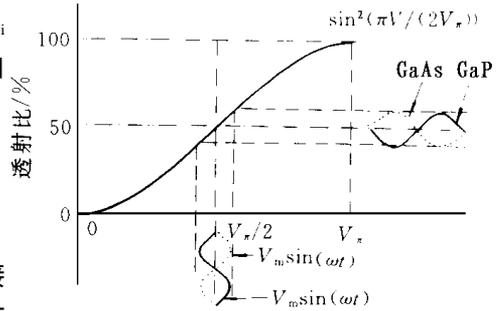


图 4 GaP 调制特性分析

5 实验结论

我们对 GaP 衬底上的共面波导进行了直接电光调制测量, 获得了良好的输入电压与输出信号之间的线性关系和 $26\text{mV} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ 的电压灵敏度 用 GaP 电光调制测量装置对 GaP 和 GaAs 共面波导进行了 1kHz 的直接电光调制测量, 得到了 GaP 输出曲线并给出了解释 用 GaP 做电光采样的研究, 目前正在实验中

参 考 文 献

- [1] A. J. Tayler *et al* , Electron Lett , 1986, **22**(2): 1068~ 1069
- [2] A. J. Tayler *et al* , IEEE J. Quantum Electron , 1988, **24**(2): 226
- [3] 孙伟, 衣茂斌, 等, 红外与毫米波学报, 1992, **11**(1): 81~ 84
- [4] B. H. Kolner *et al* , IEEE J. Quantum Electron , 1986, **QE-22**(1): 79~ 93
- [5] T. Nagatsuma *et al* , J. Appl Phys , 1989, **66**(9): 4001~ 4009
- [6] M. Shinagawa *et al* , IEEE Trans Instrum. Meas , 1992, **41**(3): 375~ 379
- [7] K. J. Weingarten *et al* , IEEE J. Quantum Electron , 1988, **24**(2): 198~ 220
- [8] D. R. Dykaar *et al* , Appl Phys Lett , 1993, **62**(15): 1733~ 1735
- [9] M. B. Yi *et al* , International Journal of High Speed Electronics and System, 1996, **7**(3): 463~ 469
- [10] A. 亚里夫, P. 叶, 晶体中的光波-激光的传播与控制, 北京: 科学出版社, 1991, 190~ 279
- [11] 顾其铮, 等, 微波集成电路设计, 北京: 人民邮电出版社, 1978, 40~ 43
- [12] M. S. Heutmaker *et al* , IEEE J. Quantum Electron , 1988, **QE-24**(2): 226~ 233

Research of Direct Electro-Optic Modulating Characteristics in GaP Crystal

Zhang Dam ing, Tian Xiaojian, Zhang Baijun, YiM aobin

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Jilin University region, Changchun 130023)

Received 3 August 1997, revised manuscript received 12 January 1998

Abstract A direct electro-optic modulating system utilizing transparent crystal GaP is reported. The authors have measured the CPW structure on the GaP substrate, obtained the curves between the input voltage and the output electro-optic signal and $26\text{mV} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ sensitivity, analyzed the output properties of GaP crystal direct electro-optic modulating