

质子轰击 GaP 外部电光采样*

张大明 田小建 孙 伟 李德辉 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: 采用质子轰击 n-GaP 晶体作为外部电光采样材料, 用倍频移相扫描电光采样技术和反射式光路结构, 对 ITO 共面波导上的微波信号进行了测量. 结果表明, 用质子轰击的方法可以使 n-GaP 样品的电阻增大四个量级, 接近于半绝缘材料, 能有效地减小 GaP 晶体内部自由电荷对电场的屏蔽效应. 在 2.30GHz 微波信号时, 质子轰击 GaP 外部电光采样测量获得了 $40\text{mV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的电压灵敏度.

关键词: 电光采样; 质子轰击; 超快光学技术

PACC: 7820J; 6180J; 4280W

中图分类号: TN206; TN29 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2000)09-0918-04

Proton-Bombarded GaP External Electro-Optic Sampling*

ZHANG Da-ming, TIAN Xiao-jian, SUN Wei, LI De-hui and YI Mao-bin

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

Received 17 July 1999, revised manuscript received 9 March 2000

Abstract: Microwave signals propagating on the indium-tin oxide coplanar waveguide were measured by proton-bombarded GaP external electro-optic sampling with multiple-frequency phase-shift scanning system. Measurements of proton-bombarded GaP sample indicate that the resistance value is four orders greater than that of the un-bombarded. The system is of $40\text{mV}/\sqrt{\text{Hz}}$ sensitivity as the microwave frequency is 2.30GHz.

Key words: electro-optic sampling; proton bombardment; ultrafast optical techniques

PACC: 7820J; 6180J; 4280W

Article ID: 0253-4177(2000)09-0918-04

* 国家自然科学基金(No. 69876014)和国家教委博士点基金(No. 97018311)资助项目[Project Supported by National Natural Science Foundation of China Under Grant No. 69876014 and by the Doctoral Foundation of the State Education Ministry of China Under Grant No. 97018311].

ZHANG Da-ming (张大明), male, born in 1970. He is a candidate for Ph. D. now. His research interest is optoelectronics.

1999-07-17 收到, 2000-03-09 定稿

1 引言

电光采样已被证明是一种时域无侵扰检测高速集成电路的有效技术^[1,2]. 它是利用电光晶体的 Pockels 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. 外部电光采样技术克服了内电光采样对衬底的依赖性并在高速电路测量中具有十分重要的应用价值, 而成为近年来受到高度重视的一种宽带在片检测技术^[3-6]. 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^[3,4]或自由放置在^[5]被测器件表面, “侵”在被测器件的电场中, 从而能够测出该处电场, 因而它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以 LiNbO₃ 为代表的氧化物铁电单晶以及以 GaAs 为代表的 III-V 族半导体材料等, 这些材料具有介电常数大或透光波长在红外区等弱点, 阻碍了亚微米空间分辨率的无侵扰电光检测系统的建立. 我们采用 GaP 电光晶体作为电场传感器, 因为 GaP 的透明波长上限为 0.55 μm , 使我们可以应用 0.67 μm 的红光, 甚至可以采用绿光做探测光束, 使电光测量的空间分辨率达到亚微米. 同时, GaP 与 GaAs 都属于 $\bar{4}3m$ 对称群, 介电常数又比 GaAs 小, 因此它能在对被测器件进行测量的同时用可见光对被测点进行观测. 但半绝缘的 GaP 却很难得到, 我们在 n-GaP 低频直接电光测量的基础上^[7], 将质子轰击后的 n-GaP 材料用做外部电光检测材料, 采用自由放置的方法和反射式光路结构, 对 ITO 上的共面波导(Coplanar Waveguide, CPW)中传输的微波信号进行了电光采样测量.

2 样品制备

先将 <100> 方向切割的 n 型 GaP(掺硫, 杂质浓度为 $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$) 晶体双面抛光, 再在其中的一个面上蒸发一层厚度约 0.5 μm 的 Al 膜作为反射镜, 镀 Al 后的材料作为外部电光检测材料. 在 ITO 玻璃上用光刻和化学腐蚀的方法制作特征阻抗为 50 Ω 的共面波导, 将电光材料自由放置在 ITO CPW 上, 测量 CPW 中的电信号. 实验发现, 用这种 n-GaP 材料测量 CPW 上传输的微波信号时, 由于晶体内的自由电荷对 CPW 电极的电场屏蔽作用, 信号电场不能有效地延伸

进入 GaP 晶体内部, 因而不能完成电光采样测量. 为了减少 n-GaP 的自由电荷对待测电场的屏蔽效应, 我们用质子轰击的方法在 GaP 样品的另一表面形成一个损伤层, 以提高该区电阻率, 从而使微波信号电场能有效地延伸进入 GaP 晶体内部, 实现电光采样测量. 我们采用多重能量叠加轰击的办法来提高损伤区的电阻率, 注入的程序为从 100—400keV 的范围内, 每隔 100keV 取一定剂量依次轰击, 这样轰击可以使损伤依次相互叠加, 从而在一定的厚度内形成损伤程度一致的损伤层. 轰击的能量和剂量分别为 420keV, $1.5 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$; 320keV, $9 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$; 220keV, $4.5 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$; 120keV, $3 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$, 轰击后得到约 4—6 μm 厚的损伤程度均匀的轰击层^[8]. 质子轰击后的 GaP 晶体测量结构如图 1 所示. 图中 CPW 上的电场分布为示意图.

3 电光采样系统

我们用倍频移相扫描技术, 采用质子轰击 GaP 晶体作为电光采样材料, 对 ITO CPW 结构中传输的微

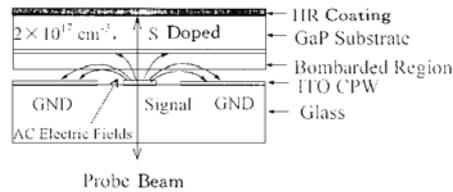


图 1 质子轰击 GaP 电光测量结构图
 FIG. 1 Geometry Structure of Proton
 Bombaraded GaP Electro-Optic Measurement
 The proton-bombarded GaP was free
 standing on the ITO CPW.

波信号进行外部电光采样测量,其测量原理如图 2 所示.微波信号经功分器分为两路,一路经移相、倍频、斩波后通过微波探针馈入到 ITO CPW 上.采用 360°线性移相器实现电子移相扫描.CPW 的输出接到 Tek.7104 采样示波器上监测待测信号.微波信号的另一路驱动半导体激光器产生超短光脉冲做为采样脉冲,其重复速率等于微波信号的频率,脉宽 16—20ps.激光器发出的超短光脉冲采样光束经准直、起偏器和 $\lambda/2$ 、 $\lambda/4$ 波片,将入射的线偏振光变换为圆偏振光,然后用聚焦透镜将光束透过 ITO CPW、质子轰击 GaP 区、n-GaP 晶体聚焦到 A1 反射镜上,对 ITO CPW 上的微波信号进行背面入射式电光采样.当微波电信号通过共面波导时,信号电场延伸进入质子轰击 GaP 晶体内(见图 1 的电场示意图),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,采样光束经测试点信号调制后被反射镜反射回分束器,由探测器接收,转换成电信号后馈入锁相放大器(Model 5209).斩波器、脉冲发生器和锁相放大器对弱信号进行相干检测和放大,用存储示波器(HP54503A)和微机对波形进行存储和分析比较.在测试系统中使用的激光器阈值是 23mA,波长为 1.3 μ m 的 InGaAsP/InP 掩埋新月形激光器.

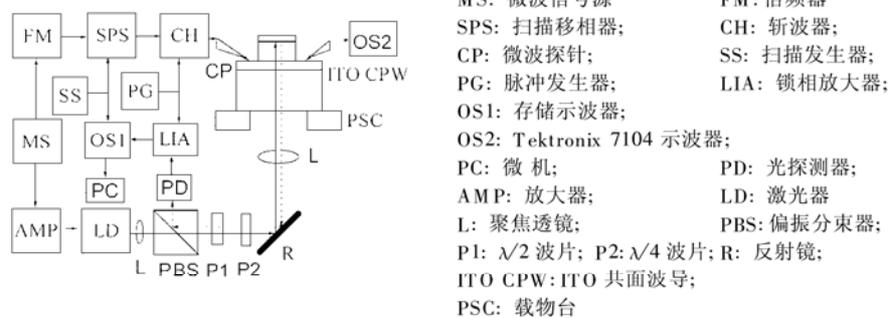


图 2 质子轰击 GaP 倍频移相扫描外部电光采样测量原理图

FIG. 2 Schematic Diagram of Electro-Optic Sampling System

4 结果及讨论

4.1 n-GaP 材料质子轰击前后的 $I-V$ 特性

在 n-GaP 上制作 CPW 样品,然后通过微波探针串接一个合适的保护电阻接到一直流电源上,测量其 $I-V$ 特性,测量结果如图 3 所示.其中, \circ 和 Δ 为实验测试值,实线为实验点的线性拟合.从图中可以看出,

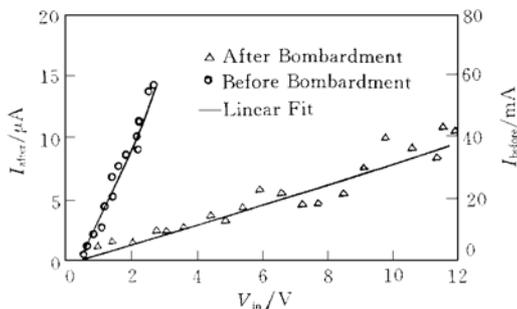


图 3 质子轰击前后 GaP 样品的 $I-V$ 特性

FIG. 3 $I-V$ Characteristics of CPW on GaP Substrate Before and After Proton Bombardment

轰击前的 n-GaP 样品的 $I-V$ 特性在电压 2.0V 以内时,呈现较好的电阻特性,其电阻值约为 50 Ω ,电压大于 2.0V 后出现轻微的金属-半导体接触特性.质子轰击该样品(CPW 面)后用同样的方法测量其 $I-V$ 特性,由图 3 的测量结果可以看出,这时的电阻已经提高到约 1.2M Ω ,并且在 6.5V 以内都呈良好的欧姆接触特性.可见由于质子轰击的结果,电阻提高了四个量级,同时,使金属-半导体接触的二极管效应变得更弱,进一步减小了二极管的电容效应,这对于微波的馈入是有利的.n-GaP 材料经过质子轰击之后电阻率提高,是因为质子轰击后相当于在 GaP 内部引入深能级缺陷,这些深能级缺陷将俘获自由载流子,使自由载流子浓度下降,从而提高了 GaP 材料的电阻率.正是由于质子轰击后电阻大幅度提高和减小了弱二极管的电

容效应才有效地减少了 GaP 晶体内自由电荷对电场的屏蔽,使微波信号电场得以有效地延伸进入 GaP 晶体内,从而完成电光采样测量.

4.2 微波信号电光采样测量

微波信号源输出 1.15GHz 的正弦信号,经倍频器后变为 2.30GHz 的信号,通过微波探针加在 ITO CPW 上,用质子轰击的 GaP 晶体做为外部电光采样材料,将其自由放置在 ITO CPW 上,用倍频移相扫描采样测试系统对这一信号进行测试,同时用 Tek. 7104 采样示波器对同一波形进行比较.测量结果如图 4 所示.其中,质子轰击 GaP 电光采样测量波形的扫描频率为 0.8Hz,等效扫描时间为 200ps/div. Tek. 7104 采样示波器测量波形的扫描时间为 200ps/div.可以看出,二者的波形符合得较好,说明用质子轰击 GaP 材料可以比较真实地再现被测的信号.图中波形的某些失真真是倍频器引起的高次谐波造成的.

4.3 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,实验时我们通过测量 2.30GHz 微波信号来测定质子轰击 GaP 外部电光采样的电压灵敏度.用 Tek. 7104 采样示波器监测待测信号的大小,当信号的峰-峰电压值为 40mV 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等效噪声带宽为 1.0Hz,从而确定的电压灵敏度为 $40\text{mV}/\sqrt{\text{Hz}}$.由于建立的质子轰击 GaP 外部电光采样测量系统是背面入射式电光采样,因此 ITO CPW 中心导体上的电势只有一部分对调制有贡献,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;再者是在轰击后样品的入射面镀增透膜,减少入射光的反射损失.

5 结论

我们在 ITO 玻璃上制作共面波导,采用质子轰击 n-GaP 的方法来减小自由电荷的数量,用倍频移相扫描外部电光采样技术测量了 ITO CPW 上的微波信号.实验结果表明,轰击后 GaP 样品的电阻提高了四个数量级,使 ITO CPW 上的微波信号电场能有效地延伸进入轰击后的 GaP 晶体内部,从而完成电光采样测量.用质子轰击 GaP CPW 对 2.30GHz 微波信号进行外部电光采样测量,获得了 $40\text{mV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的电压灵敏度.对微波信号的电光测量说明,用质子轰击的方法,可以有效地减小 n-GaP 中的自由电荷数量,使质子轰击后的 GaP 能够做为透明的电场传感器,为实现亚微米空间分辨率的高速集成电路外部电光采样测试做了基础工作.

参 考 文 献

- [1] J. A. Valdmanis and G. Mourou, IEEE J. Quantum Electron., 1986, **QE-22**(1): 69—79.
- [2] M. S. Heutmaker, T. B. Cook, B. Bosacchi *et al.*, IEEE J. Quantum Electron., 1988, **24**(2): 226—233.
- [3] T. Nagatsuma, IEICE Trans. Electron., 1993, **E76-C**(1): 55—63.
- [4] M. Shinagawa and T. Nagatsuma, IEEE Trans. Instrument. Measurement, 1994, **43**(6): 843—847.
- [5] D. R. Dykaar, R. R. Kopf, E. J. Laskowski *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1993, **62**(15): 1733—1735.
- [6] M. B. Yi, W. Sun, X. J. Tian *et al.*, International J. High Speed Electronics & Systems, 1996, **7**(3): 463—469.
- [7] 张大明, 田小建, 张佰军, 等, 半导体学报, 1999, **20**(2): 168—171 [ZHANG Daming, TIAN Xiaojian, ZHANG Baijun *et al.*, Chinese Journal of Semiconductors, 1999, **20**(2): 168—171 (in Chinese)].
- [8] J. P. Donnelly and C. E. Hurwitz, Solid-State Electronics, 1977, **20**(8): 727—730.

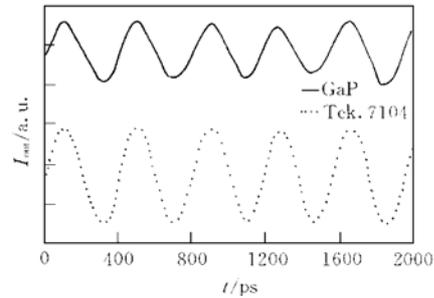


图 4 2.30GHz 微波信号的质子轰击 GaP 电光采样测量结果和采样示波器 Tek. 7104 测量结果
FIG. 4 2.30GHz Microwave Signals Measured by Proton Bombarded GaP CPW and Tektronix 7104 Sampling Oscilloscope