

质子轰击 GaP 电光采样测量*

张大明 田小建 王艳双 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)

TM 250.6

摘要 在 n-GaP 衬底上制作共面波导(CPW), 用质子轰击的方法减小共面波导的漏电损失, 用倍频扫描移相电光采样技术测量了 1~5GHz 微波信号, 质子轰击后 GaP CPW 的电阻增大了 4 个量级, 在 2.30GHz 微波信号时, 质子轰击 GaP CPW 电光采样测量获得了 $10\text{mV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的电压灵敏度.

关键词 质子轰击, GaP 共面波导, 电光采样.

磷化镓

引言

电光采样^[1]技术是近年来发展的光机电一体的在片无侵扰检测技术, 在高速集成电路测量中具有十分重要的应用价值, 因此受到高度重视. 它是利用电光晶体的 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. 电光采样技术有衬底内部电光采样和外部采样两种. 内电光采样要求被测器件的衬底为电光晶体^[2], 因此不能测量非电光晶体(如 Si)为衬底的集成电路, 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^[1,4,5]或放在^[6]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 、 LiNbO_3 ^[3] 系列和 GaAs ^[4,5,7]、 Al-GaAs ^[6] 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. 通常的电光采样系统使用的激光器波长为 $1.3\mu\text{m}$ 左右, 使系统的空间分辨率无法达到亚微米. 我们采用 GaP 电光晶体做为电场传感器, 因为 GaP 是淡黄色透明的, 其透明波长上限为 $0.55\mu\text{m}$, 使我们可以用 $0.67\mu\text{m}$ 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 具有相同的对称性, 介电常数又比 GaAs 小, 因此它能在被测器件进行测量的同时对被测点进行观测. 本文在 n-GaP 衬底上制作共面波导(CPW), 用质子轰击的方法减小共面波导的漏电损失, 取得较好效果.

1 样品制备

我们用光刻和蒸发方法在双面抛光并沿(100)方向切割的 n-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). 实验中发现, 在这种 n-GaP CPW 上传输微波信号时, 信号不能有效地馈入 CPW, 当 CPW 输入端的微波信号功率为 1mW 时, 输出端的信号

* 国家教委博士点基金(编号 97018311)资助项目
稿件收到日期 1998-05-06, 修改稿收到日期 1998-08-14

功率仅为 $50\mu\text{W}$ 左右,由掺杂引起的漏电损失达 95%。为减少 CPW 上的漏电损失,我们用质子轰击的方法在 GaP CPW 表面形成一个损伤层,以提高该区电阻率,从而使微波信号能有效地加在 CPW 上,实现电光采样测量。质子轰击后的 GaP 晶体 CPW 结构如图 1。图中中心导体电极条宽 $100\mu\text{m}$,距两侧地线 $80\mu\text{m}$,导体电极厚度 $0.1\mu\text{m}$ 。这种结构保证了当 GaP 相对介电常数为 10^{10} 时,其微波等效阻抗为 50 欧姆(对半绝缘材料)。

我们采用多重能量叠加轰击的办法^[9]来提高 GaP 的电阻率,注入的程序为 $100\text{k}\sim 400\text{keV}$ 范围,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 $4.0\mu\text{m}$ 厚损伤程度均匀的轰击层^[10]。

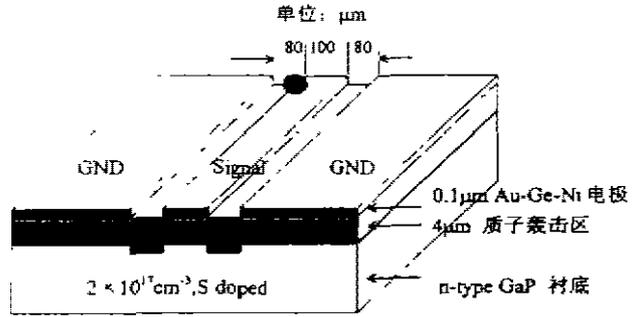


图 1 质子轰击 GaP 晶体 CPW 结构图
Fig. 1 The geometry structure of proton-bombarded GaP CPW

2 倍频扫描移相电光采样系统

由于倍频移相扫描可以用较低重复速率的激光器完成对频率较高器件的采样测量,因此我们用这种方法对质子轰击 GaP 衬底上 CPW 结构中的微波信号进行了内部电光采样测量,其测量系统原理如图 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 GaP 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 $16\sim 20\text{ps}$ 。由于两路信号来自

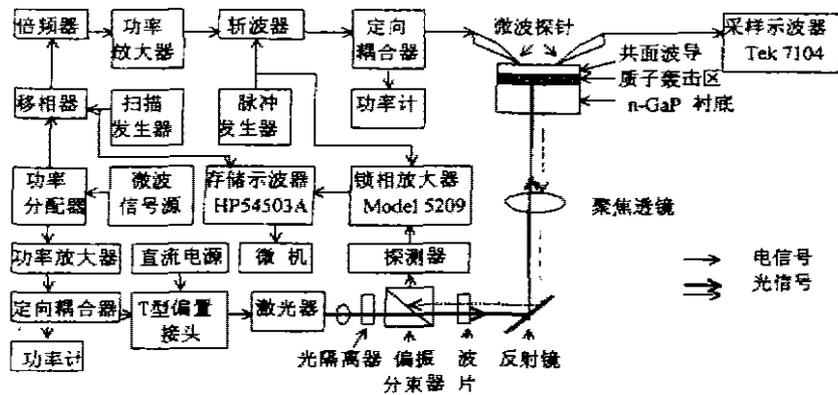


图 2 倍频移相扫描电光采样测量原理图
Fig. 2 Schematic diagram of the electro-optic sampling system

同一信号源,从而使被测信号与采样脉冲具有同步关系.激光器发出的超短光脉冲采样光束经准直、棱镜起偏器和波片组,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 GaP 衬底聚焦到共面波导线的下表面上,对质子轰击后的 GaP CPW 进行背面入射式电光采样.当共面波导线通过微波电信号时,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,采样光束经测试点信号调制后被 CPW 电极反射回分束器,由慢探测器接收,转换成电信号后馈入锁相放大器.由扫描发生器、移相器、倍频器组成移相扫描单元,与同步示波器一起完成时间扫描及波形显示.用斩波器、脉冲发生器和锁相放大器对弱信号进行相干检测和放大,用存储示波器和微机对波形进行存储和分析比较.选取扫描频率为 0.8Hz 以提高信噪比.测试系统使用的激光器是阈值为 23mA、波长 $1.3\mu\text{m}$ 的 In-GaAs/InP 掩埋新月形大功率激光器.

3 测量结果及分析

3.1 n-GaP CPW 轰击前后的 I - V 特性

将 GaP CPW 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,改变直流电压值测量其 I - V 特性,测量结果如图 3(a)所示.从图中可以看出,当电压在 2.0V 以内时,CPW 有较好的欧姆接触特性,其电阻值约为 $10^2\Omega$,电压大于 2.0V 后的非线性是由于在合金过程中欧姆接触做得不理想,从而形成了弱二极管效应造成的.

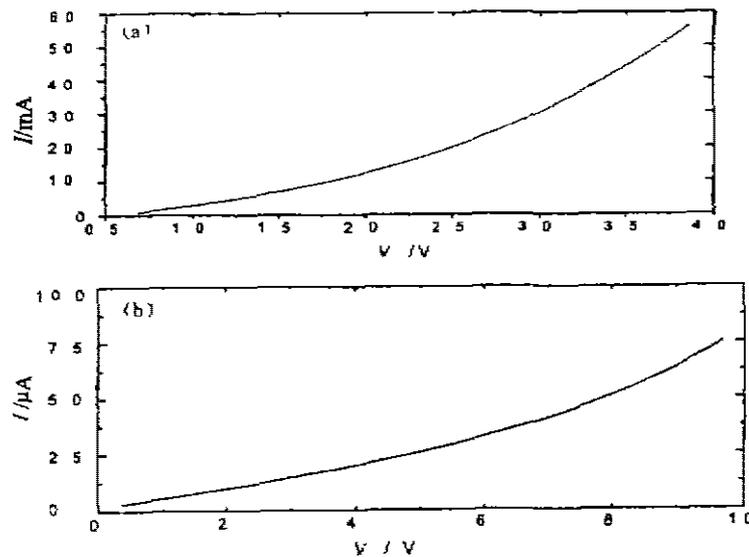


图 3 质子轰击前后 GaP CPW 样品的 I - V 特性 (a) 轰击前,(b) 轰击后
Fig. 3 Current-voltage characteristics of Coplanar Waveguide (CPW) on n-GaP substrate without (a) and with (b) multi-energy proton bombardment, respectively

质子轰击 GaP CPW 后用同样方法测量该样品的 I - V 特性,测量结果如图 3(b)所示.由图可以看出,这时的电阻已经提高到 $\sim 10^6\Omega$ 量级,并且在 6.5V 以内都呈良好的欧姆接触特性,可见由于质子轰击使电阻提高了 4 个量级,同时,使金-半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 内部引入深能级杂质缺陷,这些深能级杂质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^[9]。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 CPW 上微波信号的漏电损失,使微波信号得以有效地馈入 CPW,从而完成电光采样测量。

3.2 微波信号电光采样测量

微波信号源输出 1.15GHz 正弦信号,经倍频器后变为 2.30GHz 的信号,通过微波探针加在质子轰击 GaP CPW 上,用倍频移相扫描采样系统测试该信号同时用 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(a)为质子轰击 GaP 电光采样测量到的波形,扫描频率为 0.8Hz,(b)为 Tek. 7104 采样示波器测量到的波形,可以看出二者符合得很好。图中波形的某些失真是倍频器引起的高次谐波造成的。

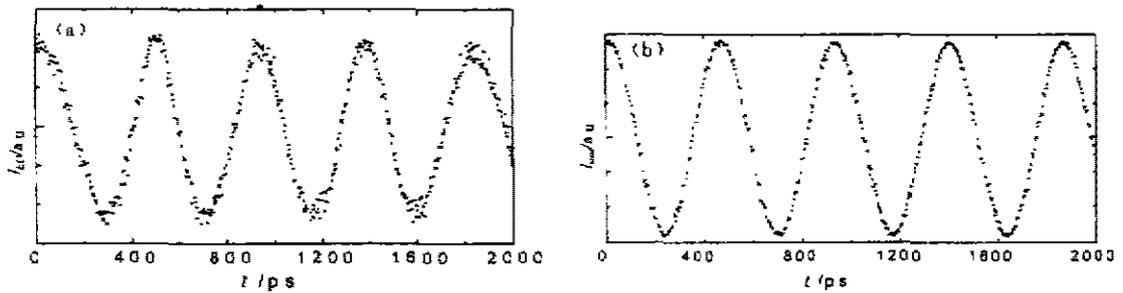


图 4 2.30GHz 微波信号测量结果

(a) 质子轰击 GaP CPW 电光采样测量结果,(b) Tek. 7104 采样示波器测量结果

Fig. 4 2.30GHz microwave signals measured by (a) proton-bombarded GaP CPW and (b) Tektronix 7104 sampling oscilloscope

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 2.30GHz 微波信号测定质子轰击 GaP CPW 的电压灵敏度,用 Tek. 7104 采样示波器监测待测信号的大小。当信号峰-峰电压值为 9mV 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 0.8Hz,从而确定电压灵敏度为 $10\text{mV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

由于建立的质子轰击 GaP CPW 电光采样测量系统是背入射式内电光采样系统,因此 CPW 中心导体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提高入射光强,二是在 GaP 晶体入射面镀增透膜,减少入射光的反射损失。

5 实验结论

我们在 n -GaP 衬底上制作了共面波导(CPW),用质子轰击的方法减小共面波导的漏电损失,用倍频扫描移相电光采样技术测量了微波信号。实验结果表明:轰击后 GaP CPW 样品的电阻提高了 4 个数量级,使微波信号能有效地加在 CPW 上,完成电光采样测量。用质

子轰击 GaP CPW 对 2.30GHz 微波信号进行直接电光采样测量,获得了 $10\text{mV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 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 CPW 的漏电损失,使质子轰击后的 GaP 能够做透明的电场传感器,进而实现对高速集成电路的外部电光采样测试.

REFERENCES

- 1 Heotmaker M S, Cook T B, Bosacchi B, *et al.* *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1988, **24**(2): 226—233
- 2 Kolner B H, Bloom D M. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1986, **QE**-(1):79—93
- 3 Nagatsuma T, Shibata T, Sano E. *et al.* *J. Appl. Phys.*, 1989, **66**(9):4001—4009
- 4 Shinagawa M, Nagatsuma T. *IEEE Trans. Instrument Measurement*, 1992, **41**(3):375—379
- 5 Weingarten K J, Rodwell M J W, Bloom D M. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **24**(2):198—220
- 6 Dykaar D R, Kopt R R, Laskowski E J, *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(15):1733—1735
- 7 Yi M B, Sum W, Tian X J, *et al.* *International Journal of High Speed Electronics and System*, 1996, **7**(3):463—469
- 8 Yariv A, Yeh P. *Optical waves in Crystals Propagation and Control of Laser Radiation*. John Wiley & Sons, Inc. 1984. 190—279
- 9 Donnelly J P, Hurwitz C E. *Solid-State Electro.*, 1977, **20**:727—730
- 10 Spitzer S M, North J C. *J. Appl. Phys.*, 1973, **44**(1):214—219

PROTON-BOMBARDED GaP ELECTRO-OPTIC SAMPLING*

ZHANG Da-Ming TIAN Xiao-Jian WANG Yan-Shuang LI De-Hui YI Mao-Bin
(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Jilin University Region, Changchun, Jilin 130023, China)

Abstract A coplanar waveguide(CPW) was fabricated on n type GaP substrate, leakage current loss of the CPW was decreased by proton-bombardment. Microwave from 1 ~ 5GHz was measured by the CPW electro-optic sampling with multiple frequency phase-shift scanning system. Measurements of proton-bombarded GaP CPW gave resistance value four orders greater than that of un-bombarded. The system has a $10\text{mV}/\sqrt{\text{Hz}}$ sensitivity as the microwave frequency was 2.30GHz.

Key words proton-bombardment, GaP coplanar waveguide, electro-optic sampling.

* The project supported by the Ph. D Program Foundation of State Education Committee of China
Received 1998-05-06, revised 1998-08-14