

GaAs 高速集成电路内部动态特性 直接电光采样检测

孙 伟 田小建 贾 刚 孙建国 衣茂斌

(吉林大学电子工程系, 集成光电子学国家重点联合实验室
吉林大学实验区, 吉林, 长春, 130023)

马振昌 王国全

(电子工业部第 13 研究所, 河北, 石家庄, 050051)

摘要 研制成功 GaAs 高速集成电路直接电光采样测试系统. 采用共轴反射式光路, 对样品进行背面直接采样. 用研制的微波探针在片驱动 GaAs 高速数字集成电路管芯, 使之处于正常工作状态. 测试系统的时间分辨率高于 20 ps, 空间分辨率为 $3\mu\text{m}$. 利用该系统在片检测了 GaAs 高速数字集成电路动态分频器内部的高速电信号.

关键词 电光采样, 微波探针, 高速集成电路, 半导体激光器, 电子移相, 在片检测.

引言

电光采样是使用超短光脉冲作为采样脉冲, 利用电光晶体的 Pockels 效应实现对高频瞬变电场波形测量的一种采样测量过程. GaAs 高速数字和微波集成电路衬底 GaAs 材料本身是电光晶体, 因而对它的测量可实现直接电光采样检测^[1]. 在电光晶体 GaAs 内激光脉冲与被测信号电场间发生相互作用, 无需移动电路中的电荷, 因而电光采样检测过程对 GaAs 集成电路的正常工作状态影响很小, 可认为是无侵扰的. 它是目前在片检测 GaAs 高速数字和微波集成电路内部动态特性的最佳方法. 显而易见, 实现这种检测并使之实用化、仪器化对于提高 GaAs 集成电路的研制和生产水平将起重要的推动作用.

在电光采样技术中, 半导体激光电光采样技术的光源体积小、造价低、技术相对简单, 具有很强的竞争力, 易于形成小型紧凑的实用化仪器. 我们在过去工作^[2,4]的基础上, 又研制成适合于 GaAs 高速数字集成电路芯片内部动态特性直接电光采样检测装置, 并对 GaAs 超高速数字集成电路动态四分频器芯片内部动态特性进行了在片测量研究.

1 GaAs 集成电路直接电光采样原理

GaAs 晶体属于立方晶系 43m 对称群, 无反演对称中心, 可以构成纵向电光调制器. 但要在 GaAs 集成电路上进行直接的电光采样测量必须满足两个基本条件: 一是在制造电路时使用的衬底晶向上存在电光效应; 二是作为采样光的激光波长必须足够长, 使探测光在衬底内不被吸收. 所幸工业上的标准芯片是 (100) 面, 恰好满足直接电光采样的要求, 后者则因我们使用的 $1.3 \mu\text{m}$ 激光在 GaAs 内是透明的而得到解决.

GaAs 高速集成电路的信号线与地线是共面的, 直接电光采样探测存在正面和背面两种方式, 如图 1 所示. 正面探测方式的探测灵敏度较低, 但适合于检测封装的集成电路. 在相同的测量条件下, 背面探测方式可取得最佳的探测灵敏度^[3].

实验中我们选择共轴反射式光路实现背面探测. 共轴反射式光路中的纵向电光调制器示意图如图 2 所示, 是由偏振分束器、 $\lambda/4$ 波片、 $\lambda/2$ 波片和待测 GaAs 集成电路芯片构成. 其中 $\lambda/4$ 波片和 $\lambda/2$ 波片分别与 GaAs 晶体 [011] 方向成 22.5° 和 33.75° 角. 由纵向电光调制器输出的光强 I 与集成电路芯片内部采样点处待测信号的电压 V 之间的关系为

$$I = I_0(1 + \pi V/V_\pi). \quad (1)$$

式中 I_0 为 $V=0$ 时纵向电光调制器输出的光强, V_π 为 GaAs 晶体的半波电压. 可见 I 的

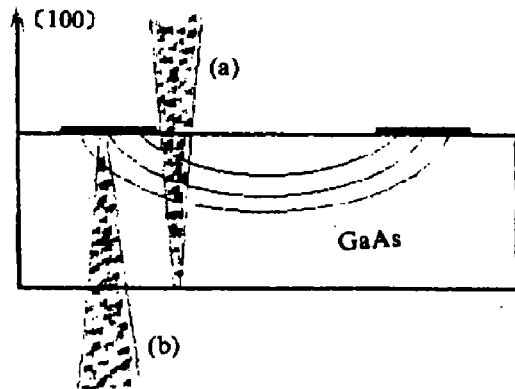


图 1 直接电光采样方式
(a) 正面探测; (b) 背面探测
Fig. 1 Probing geometries for direct electro-optic sampling
(a) Front-side probing;
(b) Back-side probing

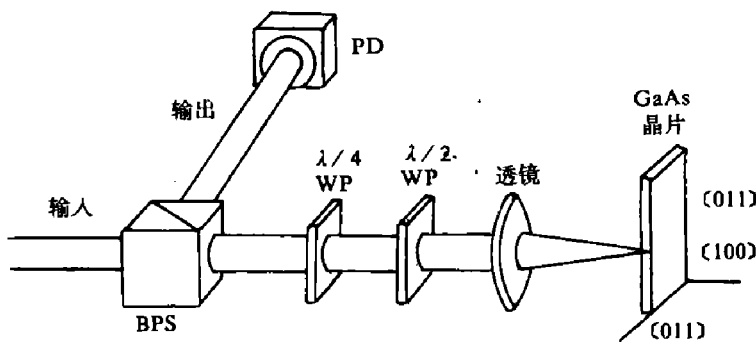


图 2 共轴反射式纵向电光调制器
Fig. 2 Electro-optic modulator with coaxial reflection arrangement

变化线性地反映了 V 的变化. 用一响应速度相对慢的探测器接收纵向电光调制器输出的光强, 然后对光电信号进行放大处理, 当采样移相器扫描时即可得到被测点上的电压随时间变化波形.

采用共轴反射式排布不仅能有效地减小光强损失, 提高探测灵敏度, 而且还使光路易于调整.

2 直接电光采样测试系统

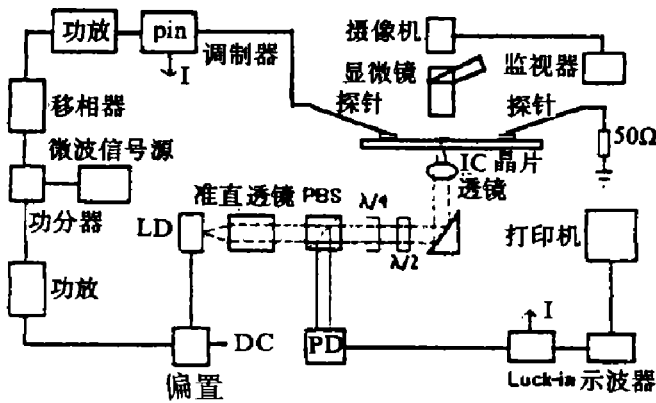


图 3 直接电光采样测试装置示意图
Fig. 3 Schematic diagram of direct electro-optic sampling system

我们研制成的 $1.3 \mu\text{m}$ 半导体激光直接电光采样测试装置示意图如图 3 所示. 由微波信号源输出的信号用功分器等分为两路: 一路经微波功率放大后通过 T 型偏置网络迭加在一直流偏置上, 用于驱动 $1.3 \mu\text{m}$ InGaAsP BC 激光器实现高速增益开关过程, 产生千兆重复率的超短光脉冲作为采样脉冲; 另一路经电子移相器后被放大, 再由微波 pin 调制器调制后, 通过微波探针输送到待测 GaAs 高速集成电路芯片的管芯上. 输出微波探针接 50Ω 匹配负载或接频谱分析仪. 由半导体激光器发射的激光用自

聚焦透镜准直, 光束直径为 2 mm . 准直后光束进入纵向电光调制器. 锁相放大器放大慢探测器接收的光电信号, 然后用存储示波器显示或记录.

显微物镜将采样光束聚焦到采样点上, 电光采样的空间分辨率由光斑直径决定, 为 $3 \mu\text{m}$. 电光采样在片检测的时间分辨率主要由采样超短光脉冲宽度决定. 我们研制的高速增益开关半导体激光器在 $1 \sim 5 \text{ GHz}$ 范围内产生的光脉冲宽度小于 18 ps . 用连续变倍体视显微镜和红外摄像监测系统观察集成电路版图、确定采样光点的位置. 用移动光点的办法来实现电光采样在片检测过程中的二维扫描.

在电光采样系统中, 我们采用自行研制的变容二极管全相位线性电子移相器替代光学延迟器作为采样移相扫描单元. 使用电子移相器不仅缩短了扫描显示时间, 使光路简化, 而且还增强了测试系统的抗振性能, 提高了测试灵敏度.

微波探针本身就是高速和微波集成电路或分立器件在片检测整体动态特性的重要工具. 由于微波信号源和微波测量仪器几乎都是采用同轴系统的, 因此微波探针是实现同轴系统到测试样品芯片压点之间的微波宽频带匹配传输的过渡器. 电光采样测量时, GaAs 高速集成电路应处于正常的工作状态, 这就要求将高速时钟信号或微波信号通过微波探针在阻抗匹配的状态下输送到待测管芯, 这是进行电光采样在片测量的必要条件. 我们在国内首次研制成适合于在片测量 GaAs 高速数字集成电路整体动态特性的微波探针, 并制成微波探针台. 在我们研制的电光采样测试装置中的样品台具有微波探针台的功能.

3 集成电路的在片检测研究

目前高速集成电路一般使用 $3\sim 10\ \mu\text{m}$ 细的金属内连线, 因此, 具有 $3\ \mu\text{m}$ 空间分辨率的电光采样系统可基本满足大多数测量的需要. 集成电路管芯中的布线情况决定着导体周围的电场分布, 衬底中的电场扩展深度接近于信号导体与地线之间的距离^[3]. 典型的集成电路衬底厚度为 $400\sim 500\ \mu\text{m}$, 远大于导体间隙, 电路内部电场分布主要集中在衬底表面. 高速集成电路衬底背面是粗糙的, 检测前须对芯片进行抛光处理, 使散射影响降低到最小, 探测光得以有效通过衬底完成电光调制.

利用 $1.3\ \mu\text{m}$ 半导体激光直接电光采样在片测试装置, 我们对 GaAs 高速数字集成电路动态四分频器电路的内部动态特性进行了在片检测研究. 测量了动态四分频器电路内部点信号的电压波形、时间和位相延迟. 所研制的微波探针触点是按动态分频器电路芯片上管芯压焊点的排布尺寸设计的, 通过微波探针将微波信号和直流偏置直接加到芯片的管芯上. 图 4 是动态四分频器电路输入级 BFL 电路图. 图 5 是在输入频率 $f=3\ \text{GHz}$ 、直流偏置 $V_{dd}=+6.0\ \text{V}$ 、 $V_{ss1}=+2.2\ \text{V}$ 、 $V_{ss2}=\text{GND}$ 时动态分频器电路输入 BFL 电路倒相放大级和缓冲级的输入、输出电信号波形. 其中曲线 b 和 c 是倒相放大级的输入、输出波形, 两者存在倒相关系, 其倒相延迟时间为 $60\ \text{ps}$. 曲线 c 和 d 是缓冲级的输入、输出波形, 测得信号经缓冲级延迟时间为 $10\ \text{ps}$. 直流偏置改变时, BFL 电路输出的电信号幅度也随之变化. $V_{dd}-V_{ss1}$ 减小时, 输出电信号幅度减小; $V_{dd}-V_{ss1}$ 增大时, 输出电信号幅度增大. 图中曲线 a 和 b 是在输入 BFL 电路之前隔直电容处的输入、输出波形, 微波信号经过隔直电容后幅度略有降低, 信号位相延迟了 $10\ \text{ps}$.

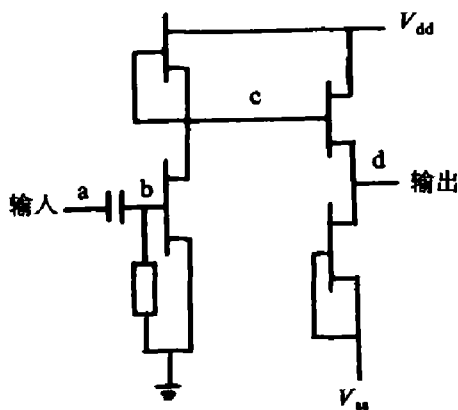


图 4 GaAs BFL 电路图

Fig. 4 Schematic diagram of BFL

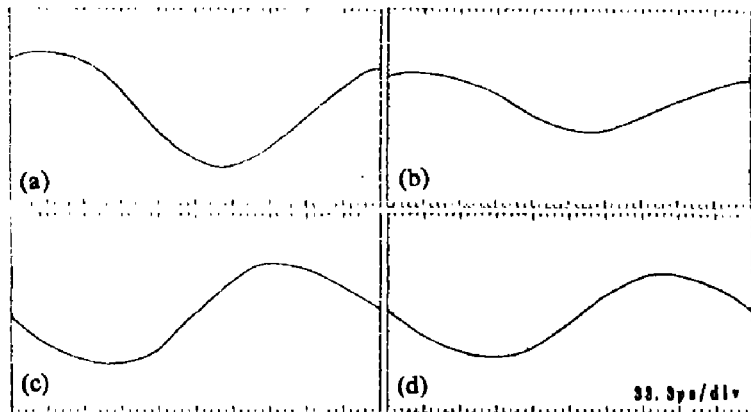


图 5 GaAs BFL 电路内部点的电光采样波形

Fig. 5 Electro-optic sampling waveforms at internal points of GaAs BFL circuit

4 结语

通过直接电光采样检测, 我们可以了解 GaAs 动态高速集成电路中有关结点、部位信

号传输的实际情况,从而为 CAD 提供准确的实验数据.这对分析电路的工作机理、改进复杂电路中子电路的设计是十分有益的.

参考文献

- 1 Weingarten K J, Rodwell M I W, Bloom D M. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **QE-24**(2):198~220
- 2 孙伟,衣茂斌,王艳辉,等. 1991 光电子器件与集成技术年会论文集,北京:清华大学出版社, 1991. 397~401
- 3 Heutmaker M S, Cook T B, Bosacchi B, et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **QE-24**(2):226~233
- 4 孙伟,衣茂斌,王艳辉,等. *半导体学报*, 1991, **12**(9):575

DIRECT ELECTRO-OPTIC SAMPLING OF INTERNAL DYNAMIC CHARACTERISTIC IN HIGH-SPEED GaAs INTEGRATED CIRCUIT

Sun Wei Tian Xiaojian Jia Gang Sun Jianguo Yi Maobin

(National Integrated Opto-electronics Laboratory (Jilin University Region),
Department of Electronic Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130023, China)

Ma Zhenchang Wang Guoquan

(13th Institute of Electronic Ministry, Shijiazhuang, Hebei 050051, China)

Abstract A direct electro-optic sampling system of high-speed GaAs integrated circuit was set up. A coaxial reflection-mode with back-side probing geometry was used in this system. For wafer-level testing of high-speed GaAs digital integrated circuits, the drive signal was delivered with a microwave probe made by the authors. The system described in this paper has a temporal resolution of less than 20 ps and a spatial resolution of 3 μm . The high-speed electric signals at internal points in the high-speed GaAs digital integrated circuit-dynamic frequency divider were measured.

Key words electro-optic sampling, microwave probe, high-speed integrated circuit, semiconductor laser, electronic phase shifter, on-wafer test.