

用超高速光电采样技术研究半导体 微波器件时域特性和频域特性*

潘家齐 袁树忠 吕福云 范万德 王劲松 李献元

(南开大学电子科学系 天津 300071)

摘要 本文采用超高速光电采样技术研究了半导体微波器件和单片微波集成电路(MMIC)的时域特性和频域特性,阐述了该方法的原理及优越性,对时域波形进行了分析和修正,并利用FFT技术将时域波形转换为频域图形,得到半导体微波器件的 S 参数。我们建立的系统测量可达100GHz以上。

EEACC: 7310N

1 前言

为满足卫星通信、雷达、现代化大容量的超高速光通讯技术、快速信息处理等技术的需要,微波器件和毫米波单片集成电路(MMIC)发展迅速,其响应时间已达到 $1\sim 2\text{ps}$,频带宽在100GHz以上。传统的测量方法,如网络分析仪已不能满足其测量要求。80年代末发展起来的超高速光电采样技术^[1,2]解决了这个困难,目前人们已开始用它来研究测量半导体微波器件的特性和材料的超快现象。

我国微波器件同样取得快速发展,8毫米波MESFET已有产品问世,3毫米波器件即将研制成功,我国微波器件测量水平不能满足研制工作的需要。根据我国实际情况,我们研制了一套超高速光电采样系统及相应软件。系统由微机控制测量、显示、数据处理。该系统可以解决我国当前研制的3毫米波($\sim 100\text{GHz}$)微波器件时域特性和频域特性的测量问题。应用这套系统我们成功地为中科院半导体所和电子部十三所等单位测量了肖特基势垒场效应晶体管(MESFET)、MMIC等器件成管和芯片的时域特性和频域特性。

2 工作原理

2.1 实验方法

图1是我们课题组研制的超高速光电采样系统示意图,锁模氩离子激光器同步泵浦染料激光器产生超短光脉冲,光经过分束后一路经固定延迟、斩波器斩波、透镜聚焦后作为激

* 国家自然科学基金资助项目
潘家齐 女,1936年出生,教授,从事微电子专业的教学与研究
1996-12-01收到,1997-04-02定稿

发光束照射到光导开关产生门上, 另一路经过可变延迟和聚焦透镜后作为采样光束照射到光导开关采样门上, 步进电机带动可变延迟移动改变采样光和激发光之间的光程差, 从而改变采样信号与待测信号之间的延迟, 并使采样输出端变为慢信号, 输出信号经锁定放大后经光电隔离、A/D 转换输入到微机进行分析、运算, 并将结果输送到指定外设

图 2 是待测微波器件连接图, 我们采用对称形式四个光导开关, 标为 1、2、3、4 当 1 作为产生门, 2 作为采样门时, 光导开关 1 产生超短电脉冲 $v_i(t)$ 首先在采样门 2 被采样 产生门产生的超短电脉冲经主传输线到达待测微波器

件, 被待测微波器件反射后又经主传输线传输, 携带了待测微波器件特性信息的反射电脉冲在采样门 2 被采样, 得到反射信号的时域波形 $V_r(t)$ 。产生门产生的超短电脉冲经主传输线到达待测微波器件经微波器件透射后, 携带了待测微波器件特性信息的透射电脉冲在采样门 4 被采样, 得到透射信号的时域波形 $V_t(t)$ 。经采样门输出的信号已是慢信号, 因而可经锁定放大器放大后经光电隔离、A/D 转换输入到微机, 可得到待测微波器件的反射和透射响应的时域图形 对时域图形进行误差修正后, 运用快速富里叶变换(FFT), 将信号波形由时域变为频域 可得到器件的 S_{11}, S_{21} 参数 同理, 当用光导开关 3 作为产生

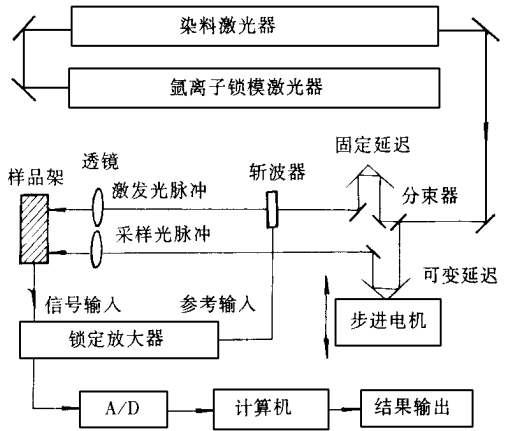


图 1 超高速光电采样测量系统示意图

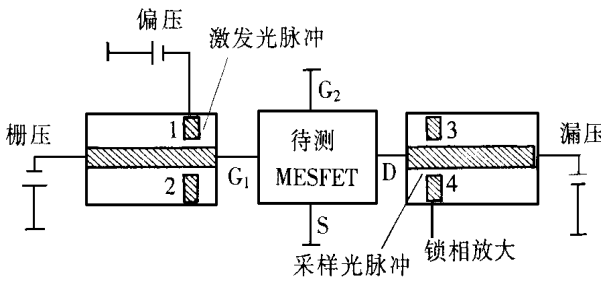


图 2 器件连接图

门, 4 作为采样门可得到 S_{22} 2 作为采样门可得到 S_{12}

2.2 S 参数的计算公式

由以上原理可知, 激发光束和采样光束是由分光镜对同一束激光分光得到的, 因而, 两束光的频率相同; 另外, 产生门和采样门参数完全相同, 所以, 两门产生超短电脉冲的波形和频率一定相同 具有相关性 入射信号的时域波形是由这两串超短电脉冲自相关得到的 反射电脉冲和透射电脉冲的时域波形是由反射电脉冲, 透射电脉冲分别与采样电脉冲互相关得到的 根据相关理论, 从采样门测得的相关函数定义为^[31]:

$$V(\tau) = \int v(t)f(t+\tau)dt = v(t) * f_s(t) \tag{1}$$

式中 $v(t)$ 为待测信号函数; $f_s(t)$ 为采样函数; τ 为时间延迟, * 代表卷积

当光导开关 1 作为产生门, 2、4 作为采样门时, 入射, 反射, 透射的相关函数为:

$$V_{2i}(t) = v_i(-t) * f_{s2}(t) \tag{2}$$

$$V_{2r}(t) = v_i(-t) * f_{s2}(t) \tag{3}$$

$$V_{4t}(t) = v_i(-t) * f_{s4}(t) \tag{4}$$

此处 下标 i, r, t 分别代表入射, 反射, 透射, 2, 4 代表第 2, 4 采样门 这里我们用 t 代替了 τ 表示改变延时使 τ 成自变量 大写字母代表相关函数, 小写字母代表实际电脉冲 由于 4 个光导开关参数全相同, 所以, $f_{s2}(t) = f_{s4}(t) = f_s(t)$, 将 (2), (3), (4) 式作 FFT 变换得到它们的频谱:

$$V_{2i}(f) = f_i^*(f) v_i(f) \quad (5)$$

$$V_{2r}(f) = f_i^*(f) v_r(f) \quad (6)$$

$$V_{4t}(f) = f_i^*(f) v_t(f) \quad (7)$$

式中 $f_i^*(f)$ 是 $f_i(f)$ 的复共轭 由 S 参数定义得 S_{11} 和 S_{21} 表达式:

$$S_{11}(f) = V_{2r}(f) / V_{2i}(f) \quad S_{11}(f) = V_{2r}(f) - V_{2i}(f) \quad (8)$$

$$S_{21}(f) = V_{4t}(f) / V_{2i}(f) \quad S_{21}(f) = V_{4t}(f) - V_{2i}(f) \quad (9)$$

同理, 用光导开关 3 作产生门, 4, 2 作采样门时可得到 S_{22} 和 S_{12} :

$$S_{22}(f) = V_{4r}(f) / V_{4i}(f) \quad S_{22}(f) = V_{4r}(f) - V_{4i}(f) \quad (10)$$

$$S_{12}(f) = V_{2t}(f) / V_{4i}(f) \quad S_{12}(f) = V_{2t}(f) - V_{4i}(f) \quad (11)$$

S 参数是复数, 它包含了幅值和相角

由以上实验原理看出由采样门输出的信号是低频信号, 真正的高频信号只局限在待测器件内部及很小一段传输线内, 减少了高频信号传输和连接的误差, 并且, 经两次相关检测过程, 大大抑制了噪声, 提高了信噪比

3 实验及分析

3.1 光导开关设计

光导开关作为超高速光电采样技术产生门和采样门, 决定系统的灵敏度和可测微波器件的频率范围, 光导开关设计是很重要的

(1) 结构设计: 为了便于待测器件与传输线连接选用微带型结构, 微带特性阻抗为 50 欧姆 为了保证产生门和采样门特性的一致将他们集成在一起 我们设计了两种不同版图的光导开关, 如图 3 (a)、(b). 图 3(a) 适用于封装好的成品管测量, 图 3(b) 适用于对管芯的测量

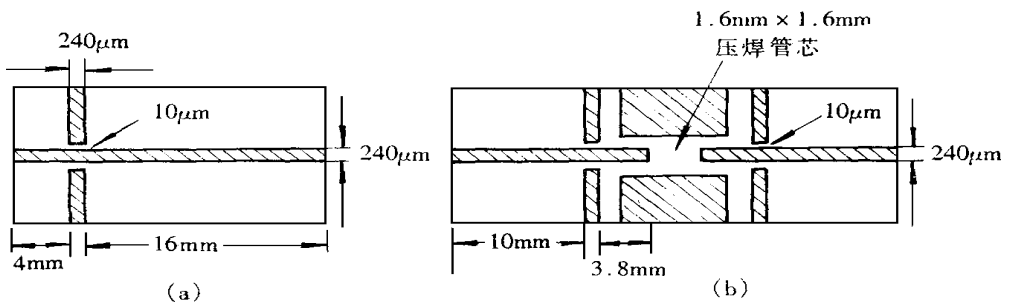


图 3 光导开关结构图

(2) 工艺设计: 我们选用 SOS 材料 (Silicon on Sapphire), 外延高阻 Si 层厚 500nm. 蓝宝石衬底厚 300 μm, 晶面 (100). 在硅层表面蒸发 Al 后光刻微带线, 衬底背面蒸 Al, 并合金化, 构成完整的微带结构, 通过离子注入 Si^{+28} 引入大量缺陷以缩短载流子寿命减小电脉冲

宽度 注入条件: $(300\text{keV}) 3 \times 10^{14} + (140\text{keV}) 1 \times 10^{14} + (40\text{keV}) 1.2 \times 10^{14}$. 注入后经 200 , 3 分钟退火 光导开关的电脉冲半强宽为 $\sim 10\text{ps}$

3.2 实验测量结果及时域图形分析、误差与修正

超高速光电采样技术测微波器件的网络参数是通过测微波器件的时域特性进而得到频域参数, 因此, 时域图形分析和误差修正, 是频域参数的基础, 又最终决定频域参数的精度 图 4(a), (b) 是电子部十三所研制的 301-150 型 M ESFET 器件的 S_{11} 和 S_{21} 时域波形

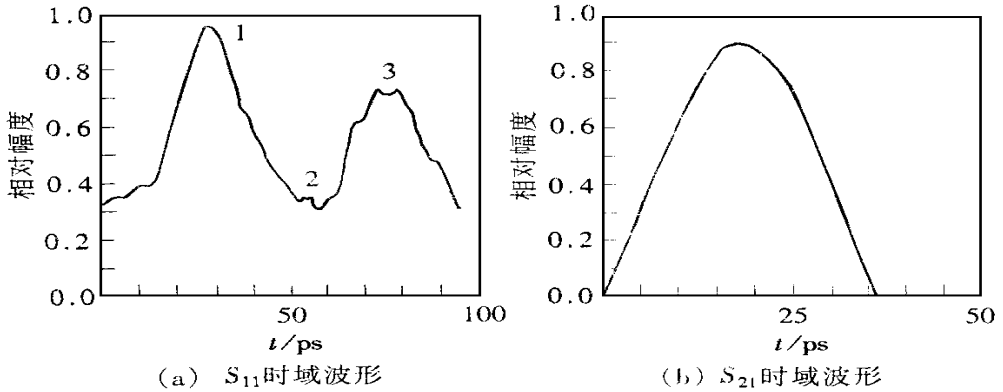


图 4 302-150 M ESFET S_{11} , S_{21} 时域波形

在图 4(a) 中, 峰 1 是入射信号的时域图形, 它是对称的, 峰 2 为入射电脉冲通过节点到达待测器件时有很小一部分被节点反射的时域图形, 峰 3 是被待测器件反射的时域图形, 因此反射峰 1, 3 是有用的, 反射峰 2 不是待测微波器件的任何特性, 我们通过时窗截取技术可将此节点反射峰修正掉 由图 4(a) 也可看到, S_{11} 时域图有一个很强的背底, 这是由于在测量 S_{11} 时采样门离产生门很近, 入射到产生门的光未被完全吸收, 被硅-蓝宝石界面反射到采样门的结果 在数据处理前, 应先将背底消掉 图 4(b) 给出的是携带了待测器件信息的透射电脉冲在采样门 4 被采到的 S_{21} 的时域图形, 这个透射电脉冲是一个较入射电脉冲有一定程度的展宽的大的透射峰 S_{21} 时域图形不需作修正

3.3 时域到频域的转换, 器件的 S 参数

1) S_{11} 时域转频域: 从修正后的时域图形中抽取出反射峰和入射峰, 分别进行快速富里叶变换, 得到反射信号和入射信号的频谱分布 两者的幅值比即为 S_{11} 的幅值, 经相角修正后, 两者的相位相减, 可得 S_{11} 相角分布

2) S_{21} 时域转频域: 将透射时域图形与入射信号时域图形分别进行快速富里叶变换, 两者的幅值比即为 S_{21} 的幅值, 经相角修正后, 两者的相位相减, 可得 S_{21} 的相角分布 图 5(a), (b) 为 S_{11} , S_{21} 的频域波形

同上分析, 当用光导开关 3 作产生门, 由光导开关 4 可测得 S_{22} 的时域图形, 由光导开关 2 可测得 S_{12} 的时域图形 经快速富里叶变换, 得到 S_{22} , S_{12} 的频域波形

3) 相角修正: 在我们测量中, 是以光导开关采样门所在平面作为待测网络的参考面, 而实际参考面应选在待测器件与光导开关主传输线连接点所在平面 两者相差了几毫米传输线长, 这将导致相角产生误差, 需进行如下修正:

$$\Delta\Phi_1(f) = 4\pi l_1/\lambda(f)$$

$$\Delta\Phi_{22}(f) = 4\pi l_2/\lambda(f)$$

$$\Delta\Phi_{21}(f) = \Delta\Phi_{12}(f) = 2\pi(l_1 + l_2)/\lambda(f)$$

其中 l_1, l_2 , 分别为两个端口参考面移动的距离

图 5 给出转换成频域后 301-350M ESFET S 参数幅值和相角曲线图, 并与网络分析仪测量(同种管形, 不是同一管芯)结果进行比较 (a)、(b) 分别为 S_{11} 的幅值和相角曲线, (c)、(d) 分别为 S_{21} 的幅值和相角曲线 实线为我们测量结果, 虚线为网络分析仪测量的结果

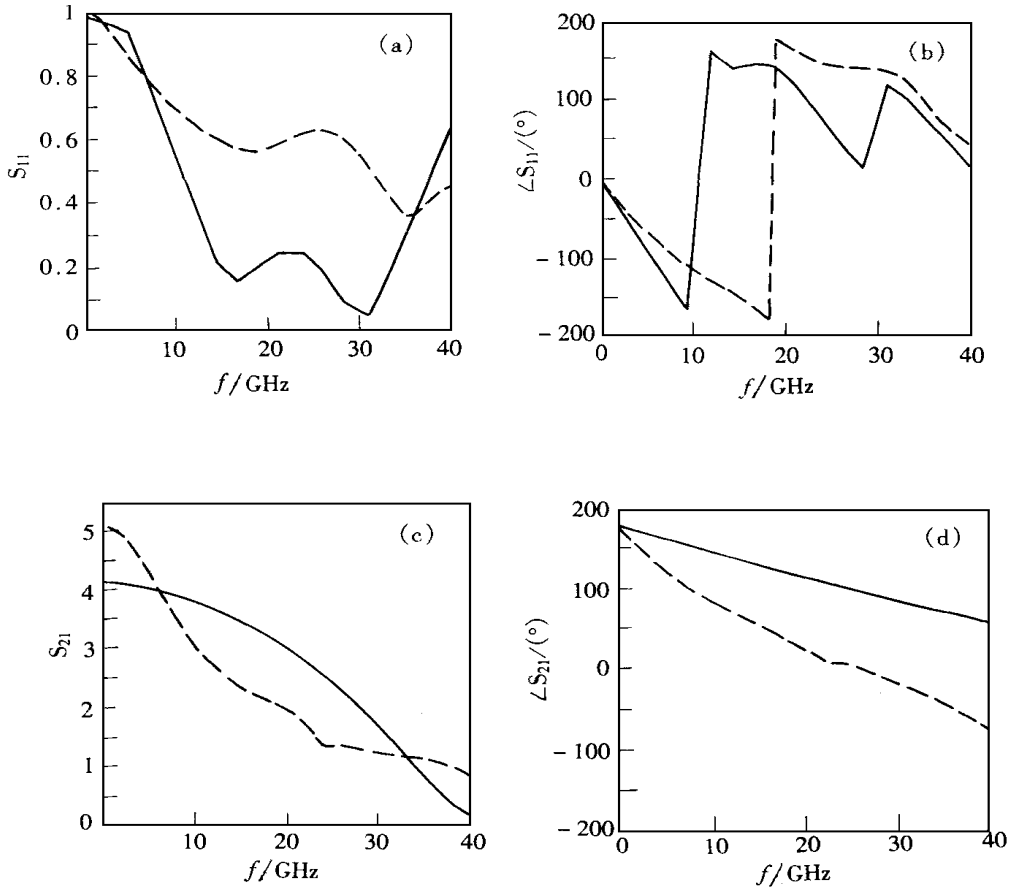


图 5 302-150M ESFET 的 S_{11}, S_{21} 频域图形

- (a) S_{11} 幅值与频率关系图形; (b) S_{11} 与频率关系图形;
(c) S_{21} 幅值与频率关系图形; (d) S_{21} 与频率关系图形

4 结论

用我们研制的超高速光电采样系统对电子部十三所和中科院半导体所研制的MES-FET、MMIC等器件的成管和芯片的时域特性和频域特性进行了测量研究, 并和自动网络分析仪测量的结果进行了比较。结果比较满意, 变化趋势极相似, 数值略有差别, 分析原因有几方面, 一为所测芯片不是同一个, 两样品个体有差异, 工作状态不同(工作点和连接方式), 从测量原理, 实验操作到数据处理完全不同的两种测量方法本身有一定差异。目前国内网络分析仪只能测到40GHz, 而该系统可测到100GHz以上。该方法的特点和优点是:

1) 它是时域测量方法, 我们只需要通过一次时域超短电脉冲以及待测器件对它的响应得出待测器件从直流到系统可达的频率上限的整个频率范围的频率的测量。该系统使用的超短激光脉冲的半强宽为 $1\sim 2\text{ps}$ 。作为超短电脉冲发生器和采样门的光导开关, 其时间分辨率为 $7\sim 10\text{ps}$ 。所以该系统可测频率范围大于 100GHz 。

2) 作为产生门和采样门的光导开关可作得距待测微波器件充分近, 微波信号只局限在待测器件内部及很小一段光导开关主传输线以内, 避免了微波信号在同外部设备连接中带来的不必要的反射及损耗。且测量信号是经两次相关检测过程大大抑制噪声, 提高了信噪比。并且, 从所测得的时域波形中能严格区分待测器件的有用信号与周围的环境的干扰, 通过时窗截取和修正得到准确真实的时域波形。这都降低了测量复杂程度, 提高了测量的精确度。

3) 系统全部由计算机控制, 时域图形直接在显示器上显示、修正、数据处理。直观形象通过快速富里叶变换得到频域特性。

超高速光电采样技术这一新型时域测量方法也是研究超高速器件响应时间和新型材料瞬态特性的重要工具。

致谢 感谢电子部十三所张绵等同志在本工作中给予我们的支持和帮助

参 考 文 献

- [1] D. E. Coop and S. C. Moss, IEEE J. Quantum Electron, 1986, QE-22(1): 94
- [2] S-L. L. Huang, E. A. Chauchard, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 1992, 40(12): 2312
- [3] H-L. A. Hung, P. Polak-Dingels, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 1989, 37(8): 1223~ 1231.

Study of Time-Domain and Frequency-Domain Characterization of Microwave Semiconductor Devices by Ultrafast Optoelectronic Sampling Technique

Pan Jiaqi, Yuan Shuzhong, Lu Fuyun, Fan Wande, Wang Jinsong and Li Xianyuan

(Department of Electronics Science, Nankai University, Tianjin 300071)

Received 1 December 1996, revised manuscript received 2 April 1997

Abstract We use the ultrafast optoelectronic sampling technique to investigate the time-domain characterization of microwave and millimeter-wave monolithic integrated circuits (MMIC). The principle and the superiority of this technique are elucidated in this paper. The time-domain waveform has been analyzed and calibrated. The time-domain response to frequency-domain transform is performed by the fast Fourier transform (FFT) and S-parameters are obtained. The system manufactured by us can measure above 100GHz .

EEACC: 7310N