

# 用超短光脉冲测量半导体微波 器件的 $S$ 参数\*

袁树忠 潘家齐 吕福云 范万德 李献元

南开大学现代光学研究所

国家教委光学信息技术科学开放实验室

天津 300071

**提要** 描述了用超短光脉冲测量微波器件  $S$  参数的基本原理和建立的测量系统。用该系统测量了频率高达 36 GHz 器件的  $S$  参数, 并同网络分析仪的测量结果进行了比较, 一致性很好。该系统测量频率可达 100 GHz。

**关键词** 超短光脉冲, 光导开关,  $S$  参数

## 1 引 言

近年来, 由于通讯、雷达、航空航天等各种技术的发展要求, 半导体微波器件和超高速数字集成电路取得了显著的进展, 已出现了频率高达几十京赫的器件; 甚至有的器件响应频率已高达 400 GHz, 对这样高频率器件的测试成了一个非常突出的问题, 特别是  $S$  参数的测量。因为一般  $S$  参数的测量是利用网络分析仪, 以频域测量为基础进行的, 但其测量的频率范围受到了一定的限制, 如美国惠普公司的 HP8510 网络分析仪, 测量频率只达 26 GHz<sup>[1]</sup>, 改进型也仅达 40 GHz。虽然经过改进频率还可以提高, 但是需要特殊的附件, 而且频率越高, 带来的误差和干扰也越大。

微波器件和系统特性既可以在时间域内, 又可以在频率域内描述。有时通过时域表征更直观些。 $S$  参数也一样, 由于计算机的普及, 使得时域测量的结果通过快速傅里叶变换, 可以和频域结果进行比较。前几年传统的电子学方法, 是用高速二极管脉冲发生器和 18 GHz 的取样示波器在时域内进行测量, 得到被测器件或系统的反射和透射波形, 对波形数据进行傅里叶变换, 就可得到  $S$  参数, 频带可达 18 GHz 或者更高。这种方法主要受脉冲发生器产生的脉冲宽度和取样示波器的上升时间限制。18 GHz 取样示波器的上升时间为 25 ps, 所以一般时域测量也受到了很大限制。

由于超短激光脉冲技术和光导(Auston)开关的发展, 在 80 年代就出现了时域测量的光电采样测量技术, 这种方法的时间分辨率可达到亚皮秒量级。有人利用这种方法来测量微波器件的  $S$  参数, 频率高达 100 GHz。并同网络分析仪进行了比对测量。在网络分析仪所能达到的

\* “863”计划光电子主题和国家自然科学基金资助项目。

40 GHz 内, 两种方法所测  $S$  参数数值和位相都符合得很好, 说明了测量结果完全可信。我们利用 1.5 ps 脉冲的同步锁模染料激光器建成了一套超高速光电导采样系统<sup>[2]</sup>, 时间分辨率已达 5 ps。用这套系统先后测量了国产 12 GHz 和 36 GHz 半导体微波器件的  $S$  参数, 也和网络分析仪 HP8510 的测量数据进行比较, 结果都符合得比较好。在这篇论文中, 重点讨论 36 GHz 的器件  $S$  参数测量和结果。

## 2 测量 $S$ 参数的基本原理

测量半导体微波器件  $S$  参数, 是把器件看作一个两端网络。用一个高频信号源给被测器件(网络)加上电压信号, 此电压一部分要被反射, 一部分传到输出端。如果器件的输出端接有匹配负载, 通过传输线理论处理<sup>[3]</sup>, 可以得出

$$\begin{aligned} S_{11} &= V_{r1}/V_{i1} \mid V_{i2} = 0 \\ S_{22} &= V_{r2}/V_{i2} \mid V_{i1} = 0 \\ S_{21} &= V_{r2}/V_{i1} \mid V_{i2} = 0 \\ S_{12} &= V_{r1}/V_{i2} \mid V_{i1} = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $V_{i1}, V_{i2}$  是输入口(端口)和输出口(端口)的入射电压;  $V_{r1}, V_{r2}$  是输入口和输出口的反射电压。上式是  $S$  参数测量的理论基础。从上式看出, 通过测量被测网络(器件)的入射电压和反射电压很容易得到其  $S$  参数。

常规网络分析仪是用矢量电压表测出  $V_{i1}, V_{i2}, V_{r1}, V_{r2}$  值的。它们的电压值含有幅值和相位。 $S$  参数也是复数形式。

时域测量微波器件  $S$  参数, 基本思想仍可把被测器件看成一两端网络, 把一个脉冲信号源产生的极短脉冲电压加到被测网络上, 再由采样示波器测量透过网络的电压信号和反射电压信号, 通过傅氏变换求得透射系数和反射系数, 即<sup>[4]</sup>

$$\begin{aligned} S_{11}(j\omega) &= F[V_{dr}(t)]/F[-V_{di}(t)] \\ S_{21}(j\omega) &= F[V_{di}(t)]/F[V_{di}(t)] \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $V_{di}(t)$  是把被测网络移去, 由示波器测得的脉冲源电压信号,  $V_{dr}(t)$  是被测网络的反射电压信号,  $V_{di}(t)$  是脉冲源电压信号透过被测网络的电压信号。三者都是包含位相参量的时域波形。从(1), (2) 两式可看出, 从时域到频域只要通过傅氏变换即可, 同理可测得  $S_{22}, S_{12}$ 。

用光脉冲测量  $S$  参数, 只是由光脉冲激发光导开关, 从而得到更短的电脉冲, 变换后其频域就更宽, 低频可从零频开始, 高可达几百京赫。第二是用光导开关采样代替了采样示波器, 大大扩宽了测量的频率范围。

## 3 实验测量

用超短光脉冲测量微波器件  $S$  参数的测量系统如图 1 所示, 光脉冲重复频率为 82 MHz, 光脉冲宽度为 1.5 ps, 皮秒光脉冲源是同步锁模染料激光器, 平均功率约为 50 mW。光脉冲由分束片 BS 分成两束, 一束经固定延迟、斩波, 由透镜聚焦照到激发光导开关缝上, 此开关上加有 60 V 左右的直流偏压, 此缝瞬时导通, 产生几个皮秒的电脉冲, 电脉冲沿主传输线传播, 到达被测器件。该器件通过主传输线给栅极和漏极加直流工作电压  $V_{gs}$  和  $V_{ds}$ , 使器件处于工作状

态。如果测量器件的反射参数  $S_{11}$ , 则取样光束经过可变延迟, 由透镜聚焦照到开关缝 2 上, 输出信号经锁相放大器放大, 输给计算机, 计算机就显示和记录下光导开关本身的相关曲线和反射信号图形。如果测量器件的透射系数, 则需要取样光束照到光导开关缝 3 或缝 4 上, 经过延迟测试, 这时计算机记录下的是表征器件透过情况的相关曲线, 它也表征了器件对脉冲的延迟展宽变化。经过傅里叶变换及归一化处理就可得出频域的  $S_{11}$  和  $S_{22}$  振幅和位相数据。

测量所用的光导开关器件如图 2 所示。它用 SOS 作衬底, 常规半导体工艺制作 Al 电极, 并用离子辐射损伤处理, 以得到短的电脉冲。图 2(a) 是测量成品器件所用的开关, 中间的长线是主传输线, 需用两个开关。主传输线的短端接器件的栅极和漏极, 源极接地, 都用导电胶接通。如果测量管芯, 则用图 2(b) 所示的开关, 管芯栅、漏电极压焊在主传输线上; 源极压焊在地线块上。

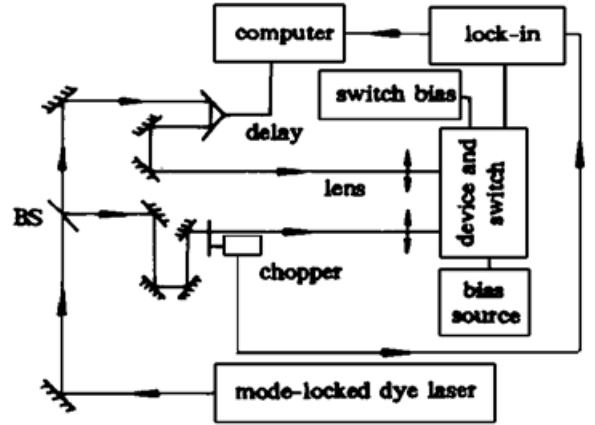


图 1 测量系统框图

Fig. 1 Schematic of the measurement system

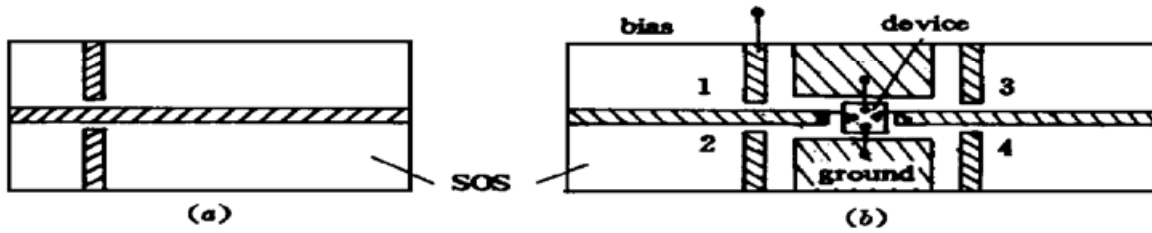


图 2 开关和器件的连接

Fig. 2 Joint of the switch and the device

### 4 测量结果和讨论

利用这套系统先后测量了电子部 13 所生产的 CX532 微波器件和 1995 年研制的 ‘301-150’N 沟场效应功率管管芯; 并和 HP8510 网络分析仪的测量结果进行了对比, 符合得都比较好。还测量了中国科学院半导体所研制封装好的 360MESFET 成品管。因为 CX532 截止频率仅达 12 GHz; 360MESFET 器件的物理分析仪数据仅测到了 20 GHz。唯有 ‘301-150’的数据全、截止频率高, 最能说明问题。我们就以 ‘301-150’器件的测量结果为例进行讨论。

#### 4.1 301-150 器件的测量结果

图 3 是测得的 ‘301-150’时域波形。图 3(a) 是反射波形。左边的峰是光开关本身的自相关曲线; 右边的峰是器件的反射波形, 中间的小峰是连接点的反射。图 3(b) 是脉冲通过器件后的传输波形。它展宽了光开关的电脉冲。图 4 是把图 3 的图形数据经傅氏变换后得到的  $S_{11}$  和  $S_{21}$  频域图形。图中虚线是根据该类器件用 HP8510 测量数据划出的曲线。

#### 4.2 讨论

从图 4 中我们可以看出:

- (1) 两种测量方法得到的结果符合得较好。器件的截止频率标称 36 GHz ( $S_{21} = 1$  的频

率), 测量结果也基本相符。图中的曲线不完全相符是因为两方法测量的不是同一器件, 高频器件的离散度大, 其误差对微波器件  $S$  参数是完全允许的;

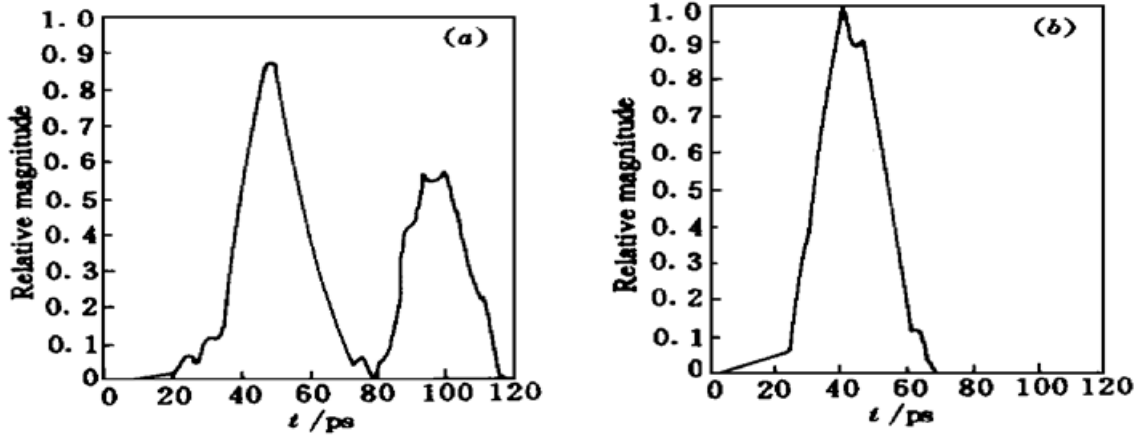


图 3 301-150 器件的时域波形。(a) 反射波形; (b) 透射波形

Fig. 3 Time-domain waveforms of 301-150. (a) waveform of reflectance; (b) waveform of transmittance

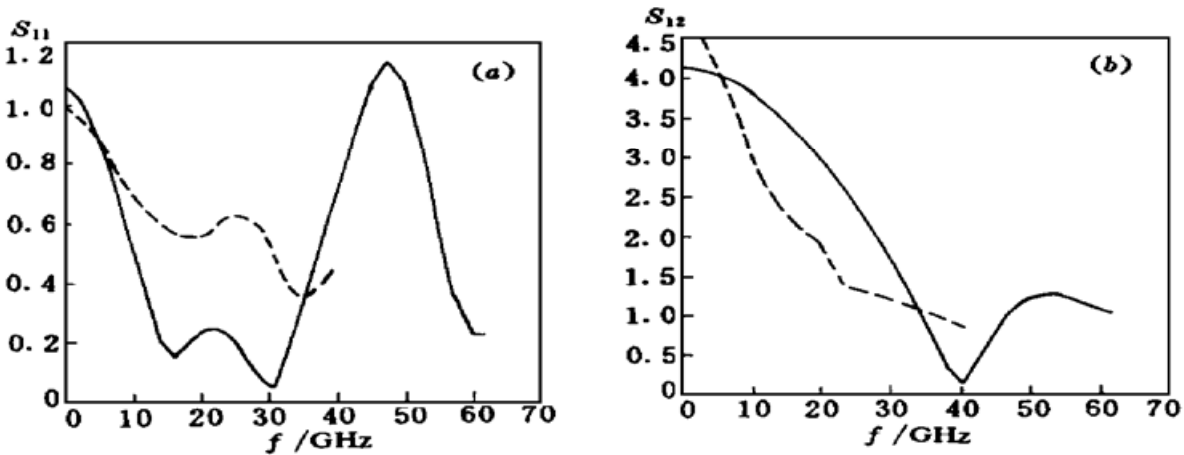


图 4 301-150 器件的  $S_{11}$  和  $S_{21}$

Fig. 4  $S_{11}$ ,  $S_{21}$  of the 301-150 device

(2) HP8510 的测量值, 频率只给到 40 GHz, 这是仪器的上限; 但是光电导采样法的频率给到了 60 GHz, 还可以再高, 但大于 40 GHz 已无意义。这里只是说明光电导采样测量的频率高。我们的系统可测量到 100 GHz;

(3) 光电导采样中, 从短脉冲产生到采样这段距离很短, 传输线的影响也很小; 因此高频部分的测量误差也就很小;

(4) 从文献[1]知, 两种测量方法测量同一器件, 其结果就会吻合得很好; 但由于条件所限, 这个工作我们未能进行。

致谢 测量中电子部 13 所张绵同志无偿提供了他们的最新研究产品, 以及 HP8510 的测试数据并帮助进行压焊连接, 在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

1 M. Matloubian, H. Fetterman. Picosecond optoelectronic measurement of  $S$  parameters and optical

- response of an AlGaAs/GaAs HBT. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1990, **38**(5) : 683~ 686
- 2 Yuan Shuzhong, Lü Fuyun, Guan Xinan *et al.*. Picosecond photoconductive sampling technique and application. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis* [南开大学学报(自然科学版)], 1994 (1) : 17~ 19 (in Chinese)
  - 3 Jiang Huanwen, Sun Xu. *Electron Measure*. Beijing : Chinese Measure Press, 1988, 362~ 365 (in Chinese)
  - 4 Su Shenghe. *Modern Time-domain Measure*. Harbin : Harbin Industry University Press, 1989, 253~ 255 (in Chinese)

## **$S$ -parameters Measurement of Semiconductor Microwave Devices by Ultrashort Optical Pulses**

Yuan Shuzhong Pan Jiaqi Lu Fuyun Fan Wande Li Xianyuan  
(*Optical Information Science Laboratory, SEC, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071*)

**Abstract** The principle to measure  $S$ -parameters of microwave devices with ultrashort optical pulses has been described. The measuring system with a maximum frequency up to 100 GHz has been developed. We have measured the devices with a frequency of 36 GHz. The results agree well with those measured by using a network analyzer.

**Key words** ultrashort optical pulses, photoconduction switch,  $S$  parameter