

共振隧穿二极管的开关时间特性*

张世林 郭维廉 梁惠来 牛萍娟 王振坤

(天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

摘要: 用 HP8510(C)网络分析仪测量了 AlAs/InGaAs/AlAs 共振隧穿二极管(RTD)的散射参数. 通过曲线拟合提取了等效电路参数, 估算了 RTD 的开关时间. 通过速度指数估算的 RTD 上升时间最小可达 21ps.

关键词: 共振隧穿二极管; 等效电路模型; S 参数; 开关时间

EEACC: 2520D; 2560X

中图分类号: TN312.2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2003)S0-0136-04

1 引言

共振隧穿二极管(RTD)是基于量子共振隧穿现象的一种两端负阻纳米器件. 由于载流子是隧穿机制, 决定了 RTD 具有非常快的工作速度和非常高的工作频率. 理论预计 RTD 的最高振荡频率可达 $1.5 \sim 2.5\text{THz}^{[1]}$. 实际 RTD 的 f_{\max} 已达到 $712\text{GHz}^{[2]}$, 最短的开关时间已达 $1.5\text{ps}^{[3]}$. 共振隧穿二极管主要应用在微波振荡和高速数字电路两大方面. 目前国外共振隧穿器件已实现大规模集成并研制成多种具有特色的高速数字电路. 在模拟电路方面, RTD 已用做微波振荡和混频器, 但在功率方面受到一定限制. 用于微波振荡的 RTD 通常用阻性截止频率来表征工作频率, 器件工作点位于负阻区. 而对于超高速脉冲数字电路中的 RTD, 工作在峰值点和谷值点间转换时, 必须用开关时间或上升时间 t_r 来表征. 然而对于 ps 级的开关时间一般只能通过电光采样技术(electron-optic sampling technique)来测定^[4]. 而这种技术所用的设备比较昂贵, 测量操作也比较复杂. 本文报道用 HP8510(C)网络分析仪测量了 AlAs/InGaAs/AlAs 共振隧穿二极管(RTD)的散射参数(S 参数). 通过曲线拟合提取等效电路参数中的本征电容和负阻阻值, 估算了所研制的 RTD 的开关时间.

2 RTD 的材料、器件和参数提取

2.1 RTD 的材料和器件

图 1 是我们所研制的 RTD 室温下的 $I-V$ 特性, 直流参数包括: 峰值电流 I_p 、峰值电压 V_p 、谷值电流 I_v 、谷值电压 V_v 、电流峰谷比 $\text{PVCR} = I_p/I_v$.



图 1 RTD 的 $I-V$ 特性

Fig. 1 $I-V$ characteristic of RTD

负阻阻值 $|R|$. 通常以 E 极接地为正向, C 极接地为反向. 图 2 为 MBE 生长的 RTD 结构. 主要考虑如下: (1) 选用 AlAs 作为势垒材料, 因为 AlAs 势垒比 AlGaAs 势垒高, 有利于对非共振隧穿电流的抑制. AlAs 势垒厚度选为 1.7nm , 势垒越薄, 峰值电流 I_p 越大, 有利于提高开关速度. (2) 在 GaAs 势阱中间再增加一层 InGaAs 子阱, 因 InGaAs 的带隙比

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 60177010)

张世林 男, 1953 年出生, 副教授, 目前从事新型半导体器件研究.

2002-09-16 收到

GaAs 更窄,其基态能级更低.可在势阱总厚度不变的情况下,降低势阱基态能级,有利于降低启动电压 V_T 和峰值电压 V_P . (3)发射区(E)和集电区(C)的掺杂浓度的选择考虑到串联电阻 R_s 和并联电容 C_d 之间的折衷.

| | | |
|---|--------|-----------------------------------|
| GaAs | 500nm | $3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ |
| GaAs | 10nm | $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ |
| GaAs | 5nm | |
| $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ | 5nm | |
| GaAs | 0.5nm | |
| AlAs | 1.7nm | |
| GaAs | 0.5nm | |
| $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ | 4nm | |
| GaAs | 0.5nm | |
| AlAs | 1.7nm | |
| GaAs | 0.5nm | |
| $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ | 5nm | |
| GaAs | 5nm | |
| GaAs | 10nm | $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ |
| GaAs | 1000nm | $3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ |
| SI-GaAs substrate | | |

图2 RTD的材料结构

Fig. 2 Material structure of RTD

2.2 等效电路模型及电路参数提取

使用 HP8510(C) 网络分析仪,在 45MHz ~ 26.5GHz 的扫频测试范围内,对该共振隧穿二极管的 S 参数进行了在片测试.所用的微波探针为 RF cascade probe.压焊点的间距为 $150 \mu\text{m}$,所测的两个管芯的有源区面积为 $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$.对单端口网络,由输出反射系数 $S_{22} = (Z_{in} - Z_0) / (Z_{in} + Z_0)$,归一化 $Z_0 = 50 \Omega$,可以导出 $Z_{in} = Z_0(1 + S_{22}) / (1 - S_{22})$,这里的 S_{22} 、 Z_{in} 都是复数.

共振隧穿二极管的等效电路如图3所示.包括RTD的本征微分负阻 R ,本征电容 C_d 、串联电阻 R_s 和串联电感 L_s .在片测试时,可分别测量 $E-C$ 两端开路 and 短路的 S 参数,将寄生参数 C_p 和 L_p 去掉.电路简化后,输入阻抗 Z_{in} 的表达式如下:

$$Z_{in} = \left[R_s + \frac{-R}{1 + (\omega RC_d)^2} \right] + j \left[\omega L_s + \frac{-\omega C_d R^2}{1 + (\omega RC_d)^2} \right] \quad (1)$$

通过计算与曲线拟合得到等效电路参数.其中

管芯 1: $R = -442 \Omega$, $C_d = 1.01 \times 10^{-13} \text{F}$, $R_s = 8 \Omega$, $L_s = 1.07 \times 10^{-11} \text{H}$

管芯 2: $R = -600 \Omega$, $C_d = 1.05 \times 10^{-13} \text{F}$, $R_s = 8 \Omega$, $L_s = 1.04 \times 10^{-11} \text{H}$

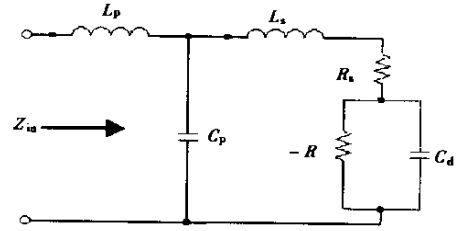


图3 RTD的等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit of RTD

3 RTD 开关时间的估算及分析

影响RTD开关时间 t_r 主要有三个时间常数^[5].

(1)电子在势阱内出现的时间常数,根据测不准关系,约为 100fs. (2)电子越过C极耗尽层 L_d 的渡越时间常数,当 L_d 约为 $0.1 \mu\text{m}$, τ 约为亚 ps 级. (3) RC_d 时间常数约为 ps 级.相比之下, t_r 主要与RTD的 RC_d 参数有关.

3.1 利用 $4RC_d$ 估算 t_r ^[6]

文献[6]提出用 $4RC_d$ 估算 t_r 的方法,其中 R 为负阻的绝对值,可以通过测量散射参数(S)来提取,也可以从直流 $I-V$ 特性平均负阻 ($|R| = (V_V - V_P) / (I_P - I_V)$) 得到. C_d 为RTD等效电路中与 R 并联的本征电容,一般通过测量散射参数优化拟合后提取.

3.2 通过速度指数(speed-index)估算 t_r ^[7]

文献[7]定义了速度指数为:

$$S_i = \frac{\Delta t}{\Delta V} = \frac{C_d}{I_P} \quad (2)$$

其中 Δt 和 ΔV 分别从峰值态到谷值态所需的时间和电压差.故

$$S_i(V_V - V_P) = \frac{C_d}{I_P}(V_V - V_P) = t_r \quad (3)$$

S_i 相当于用峰值电流 I_P 对RTD本征并联电容 C_d 充电所需的时间.从量纲可以看出它相当于单位电位差的一个时间常数,如果乘以 ΔV 则表示跨越 ΔV 起始态和终止态间所用的时间.例如, $S_i(V_V - V_P) = \Delta t_{P \rightarrow V}$,则 $\Delta t_{P \rightarrow V}$ 便表示从峰值态跳变到谷值态所需的时间.

现在结合 $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ RTD 的一些测量结果,分别采用上述两种方法来估算RTD的 t_r 并进行比

较: (1) 利用 $t_r = 4RC_d$ 估算. 从散射参数(S)测量后提取出 $|R| = 422\Omega$, $C_d = 101\text{fp}$. 代入得 $t_r \approx 170.4\text{ps}$. 若从 I - V 特性上, 计算出平均 $|R| = 429\Omega$ 代入得 $t_r \approx 173.3\text{ps}$. (2) 利用速度指数 S_i 估算. 按(3)式 $S_i = C_d/I_P$, $C_d = 101\text{fp}$, $I_P = 1.9\text{mA}$, $S_i = 53\text{ps/V}$. 估算从峰值跳变到谷值所需的开关时间 $t_r = S_i(V_V - V_P) \approx 53\text{ps/V} \times 0.4\text{V} = 21\text{ps}$. 根据另一组数据, $C_d = 1.05 \times 10^2\text{fp}$, $I_P = 1.3\text{mA}$, $V_V - V_P = 0.45\text{V}$, 可得 $t_r = 36.3\text{ps}$.

3.3 影响 RTD 开关时间的因素

以上分析可看出, 减小 RTD 开关时间的主要途径是减小电容 C_d 和负阻阻值 R .

(1) 减小电容 C_d . 图 3 中的电容 C_d 实际包括两部分, 一是由器件结构和工艺形成的. 例如, 从 RTD 的发射极 E 金属 NiGeAu 在 SiO_2 或 Si_3N_4 薄膜上沉积的 CrAu 引线(到达 SI-GaAs 衬底压焊点上)与下面外延各层间的电容. 这部分电容靠改进器件结构和工艺(如空气桥结构)来减小. 二是与 RTD 的异质结核心部分(包括两垒单阱 DBW 和 C 区耗尽层)有关的本征电容, 其电容大小为^[5]

$$C_w = \frac{\epsilon_s}{L_B + L_W + L_d} \left(\frac{1}{1+k} \right) \quad (4)$$

$$k = \frac{L_d^2(L_B + L_W)}{2\epsilon_s v_{\text{sat}}(L_d + L_B + L_W)R_w} \quad (5)$$

其中 L_B 和 L_W 分别表示 DBW 的垒宽和阱宽; L_d 为 C 区耗尽层厚度; v_{sat} 为电子穿越耗尽区的饱和速度; R_w 为 DBW 的等效电阻; k 的含义是由于电子在 C 区耗尽层中穿越对电容带来的影响. 以上分析看出电容 C_w 的大小主要与 L_B 、 L_W 和 L_d 有关, L_B 和 L_W 主要和 DBW 核心区设计有关, 而 L_d 主要由 C 区掺杂浓度确定, 掺杂浓度越低, L_d 越大, C_w 越小.

(2) 减小负阻阻值 R 或增大电导 G . 电导 G 通

常随势垒厚度 L_B 的减小作指数性增长, 可见减小 L_B 很重要. 另外在材料选择上用电流密度大, 迁移率高的材料, 同时 C 区掺杂多些, 使 L_d 小些, 但这与减小 C_w 矛盾.

4 结论

本文测量了 RTD 散射参数, 通过曲线拟合提取等效电路参数. 用两种方法估算了所研制的 RTD 开关时间, 分析了影响 RTD 开关时间的因素.

参考文献

- [1] Sollner T C L G, Goodhue W D, et al. Resonant tunneling through quantum well at frequencies up to 2.5THz. Appl Phys Lett, 1983, 43: 588
- [2] Brow E R, Soderstrom J R, Parker C D, et al. Oscillations up to 712GHz InAs/AlSb resonant tunneling diode. Appl Phys Lett, 1991, 58: 275
- [3] Shimizu N, Nagatsuma T, Waho T, et al. $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{AlAs}$ resonant tunneling diodes with switching time of 1.5ps. Electron Lett, 1995, 31(19): 1695
- [4] Shimizu N, Nagatsuma T, Shinagawa M, et al. Picosecond-switching time of $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{AlAs}$ resonant-tunneling diodes measured by electro-optic sampling technique. IEEE Electron Device Lett, 1995, 16(6): 262
- [5] Diamond S K, Ozbay E, Rodwell M J W, et al. Resonant tunneling diodes for switching applications. Appl Phys Lett, 1989, 54(2): 153
- [6] Chow D H, Schulman J N, et al. Investigation of $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{AlAs}$ resonant tunneling diodes for high speed switching. Appl Phys Lett, 1992, 61(14): 1685
- [7] Auer U, Prost W, et al. Low-voltage MOBILE logic module based on Si/SiGe interband tunneling diodes. IEEE Electron Device Lett, 2001, 22(5): 215

Switching Characteristics of Resonant Tunneling Diodes^{*}

Zhang Shilin, Guo Weilian, Liang Huilai, Nui Pingjuan and Wang Zhenkun

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Using a HP8510(C) network analyzer, the scattering parameter (S_{22}) of AlAs/InGaAs/AlAs resonant tunneling diodes (RTD) is measured. Equivalent circuit parameters are obtained by curve fit. The RTD switching time is estimated by using the measured capacitance and average negative differential resistance. The minimum rise time of the sample is estimated to be 21ps.

Key words: resonant tunneling diodes (RTD); S parameter; equivalent circuit; switching time

EEACC: 2520D; 2560X

Article ID: 0253-4177(2003)S0-0136-04

^{*} Project supported by National Natural Science Foundation of China(No. 60177010)

Zhang Shilin male, was born in 1953, associate professor. He is engaged in the research on the semiconductor novel devices.

Received 16 September 2002

©2003 The Chinese Institute of Electronics