

量子共振隧穿二极管的频率特性与分析*

张世林¹ 牛萍娟¹ 梁惠来¹ 郭维廉¹ 赵振波¹ 郝景臣² 王文君² 周均铭³ 黄 纪³

(1 天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

(2 信息产业部十三所, 石家庄 050001)

(3 中国科学院物理研究所, 北京 100083)

摘要: 用 HP8510C 网络分析仪测量了 AlAs/InGaAs/AlAs 共振隧穿二极管的 S 参数, 通过实测曲线拟合提取器件等效电路参数, 计算出所研制器件的阻性截止频率为 54GHz, 并分析了影响器件工作频率的因素.

关键词: RTD; S 参数; 频率特性

EEACC: 2520D; 2560X

中图分类号: TN312.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2002)11-1192-04

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纳米负阻器件. 器件结构的主要特点是, 当采用两种不同材料形成异质结时, 将在界面形成能带不连续性, 而能带的不连续会形成量子阱. 用分子束外延(MBE), 在半绝缘的 GaAs 衬底上生长一个多层次超晶格材料结构, 其中外层宽带隙材料 AlAs 两个薄层夹着一个窄带隙材料 InGaAs 薄层^[1]. 外层的作用使中心层形成一个准束缚态势垒. 当量子阱的尺寸与德布罗意电子波长具有相同量级时, 导致阱区域能量量子化. 当在 RTD 两端加上电压, 使入射电子能量与量子阱中能级一致时, 就会产生共振隧穿, 随外加电压不断增加, 电流先达到一个局部最大值, 即峰值电流(I_p). 电压进一步增大, 共振隧穿的条件破坏, 穿过势垒层的电子数目大大减小, 电流下降表现为负阻(NR)效应, 直到谷值电压(V_c)电流达到谷值电流(I_v). 随着电压进一步增加, 通过势垒发射电流成为主要电流, 电流随电压增大而增加. 理论预计 RTD 的电流峰值到谷值之间的转换率可达 2.5THz^[2]. 实际 RTD 器件的振荡频率已达 712GHz^[3]. 用 In_{0.53}Ga_{0.47}As/AlAs 材料制成的

RTD 开关时间达 1.5ps^[4].

共振隧穿器件主要应用在微波振荡和高速数字电路两大方面. 前者为高频小信号正弦波振荡, 为模拟或线性电路; 后者为高频大信号脉冲数字电路. 由于两种情况下器件工作状态不尽相同, 故描述它们性能所用的参数也不相同. 对前者用阻性截止频率(f_R), f_R 测量多与微波方面的应用有联系; 对后者用开关时间(t_s)或上升时间(t_r)则比较合适. 本文使用 HP8510C 网络分析仪测量 S 参数, 通过拟合优化提取 RTD 的等效电路参数, 得到所研制器件的 f_R , 分析了影响频率特性的主要因素.

2 测量原理

2.1 S 参数的定义

RTD 可以看作是一个单端口线性网络, 根据微波理论, 可把 RTD 的 S 参数表示为:

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0}, \text{输出端接匹配负载时的反射系数}$$

$$S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0}, \text{输入端接匹配负载时的反射系数}$$

其中 a_1, a_2 为入射波; b_1, b_2 为反射波. 设单端口网

* 国家自然科学基金(批准号: 60177010) 和天津市自然科学基金(No. 013601411) 资助项目

张世林 男, 1953 年出生, 副教授, 目前从事新型半导体器件研究.

2002-02-25 收到, 2002-05-07 定稿

©2002 中国电子学会

络的输入阻抗为 Z_{in} , 负载归一化阻抗为 Z_0 , 可推出

$$S_{22} = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (1)$$

对于振荡设计, $|S_{11}|$ 和 $|S_{22}|$ 均大于 1. 图 1 是测试所用 RTD 器件的 $I-V$ 特性. 室温下电流峰谷比 (PVCR) 约为 5:1^[5]. 图 2 为生长的 RTD 的材料结构. 图 3 是测量所得 S_{22} 参数的 Smith 圆图.

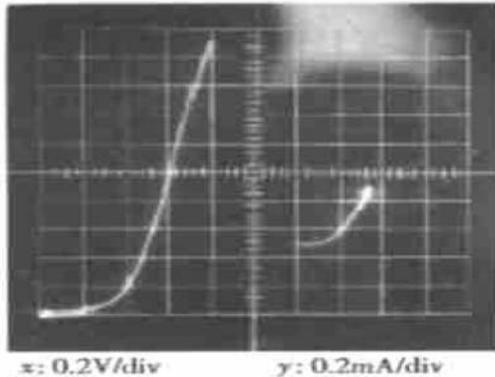


图 1 RTD 的 $I-V$ 特性

Fig. 1 $I-V$ characteristic of RTD

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

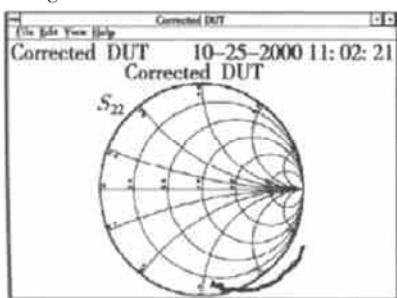


图 3 单端口测量的史密斯圆图

Fig. 3 Smith chart of measurement in one port

2.2 RTD 的等效电路

对于共振隧穿二极管这种负阻振荡器, 首先建立起等效电路模型^[6], 如图 4 所示, 包括 RTD 的本征电阻 R , 本征电容 C_d , 串联电阻 R_s (包括引线电阻, 欧姆接触和晶片的扩展电阻) 及串联电感 L_s . 在片测试时, 可分别测量 $E-C$ 两端开路和短路时的 S 参数, 将寄生参数 C_p 和 L_p 去掉. 电路简化后, 给出

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

由(1)式可得

$$Z_{in} = Z_0 \frac{1 + S_{22}}{1 - S_{22}} \quad (3)$$

其中归一化阻抗 $Z_0 = 50\Omega$, S_{22} 和 Z_{in} 都是复数.

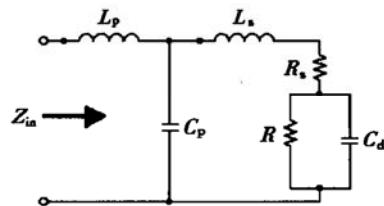


图 4 RTD 的等效电路图

Fig. 4 Schematic diagram of equivalent circuit of RTD

3 器件等效电路的参数提取

HP8510C 网络分析仪的测量频率范围为 45MHz~26.5GHz, 可将其分为 201 个频率点, 在每个频点上测量 S_{11} 或 S_{22} 参数. 用计算机将 S_{22} 参数换成 Z_{in} , 即在 N 个离散频率上给出阻抗 Z_{in} 的精确测量值. 这些数据点的数目大大超过等效电路参量的数目. 根据这些数据利用拟合的方法可以找到对于电路参量的最佳估算. 若在第 k 次测量数据中, 阻抗 Z_{in} 实部 X_k 与测量值 \hat{X}_k 的误差为 Δ_k

$$\Delta_k = \hat{X}_k - \left[R_s + \frac{-R}{1 + (\omega R C_d)^2} \right] \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

N 为总的测量次数. 将它们平方相加得到总的误差

$$\epsilon = \sum_{k=1}^N \Delta_k^2 = \sum_{k=1}^N \left| \hat{X}_k - \left[R_s + \frac{-R}{1 + (\omega R C_d)^2} \right] \right|^2 \quad (5)$$

我们希望 ϵ 愈小愈好, 改变参数 R_s , R 和 C_d 使 ϵ 最小. 将(5)分别对 R_s , R 和 C_d 求偏导数, 并让它们等于零, 由计算机解出 R_s , R 和 C_d 的值. 图 5 给出电路参数拟合结果.

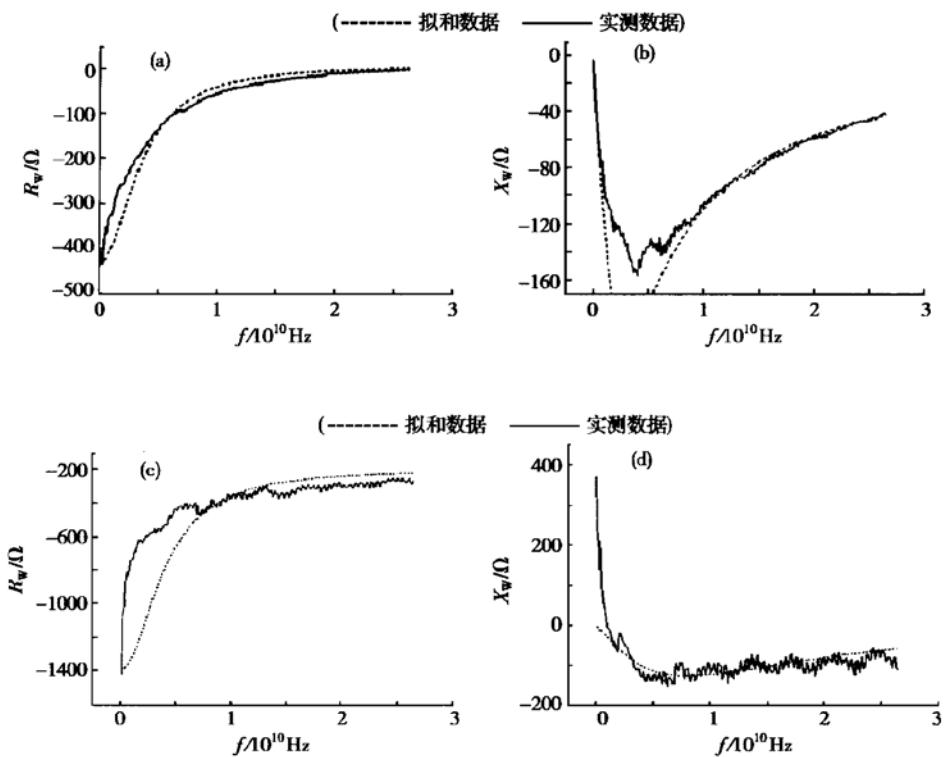


图 5 (a) 阻抗实部拟合结果; (b) 阻抗虚部拟合结果; (c) 阻抗实部拟合结果; (d) 阻抗虚部拟合结果

Fig. 5 (a) Curve fit results of the real part impedance; (b) Curve fit results of the imaginary part impedance; (c) Curve fit results of the real part impedance; (d) Curve fit results of the imaginary part impedance

4 结果分析

图 5(a) 为阻抗实部拟合结果, 图 5(b) 为阻抗虚部拟合结果, 所测器件发射区面积为 $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$, 提取电路参数为 $R_s = 8\Omega$, $R = 442\Omega$, $C_d = 1.01 \times 10^{-13}\text{F}$, $L_s = 1.06 \times 10^{-11}\text{H}$. 图 5(c) 为阻抗实部拟合结果, 图 5(d) 为阻抗虚部拟合结果, 所测器件发射区面积为 $4\mu\text{m} \times 4\mu\text{m}$, 提出电路参数为 $R_s = 7\Omega$, $R = 1200\Omega$, $C_d = 3.28 \times 10^{-14}\text{F}$, $L_s = 1.08 \times 10^{-11}\text{H}$. 根据阻性截止频率的定义, 由(2)式可得电阻性实部阻抗为零时的频率:

$$f_R = \frac{1}{2\pi R C_d} \sqrt{\frac{R}{R_s} - 1} \quad (6)$$

把提取的电路参数代入上式, 得出阻性截止频率, $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ 和 $4\mu\text{m} \times 4\mu\text{m}$ 分别为 26.3GHz 和 54.0GHz . 从两种几何尺寸器件的参数提取和频率特性来看, 尽管发射区面积 $4\mu\text{m} \times 4\mu\text{m}$ 器件的负阻值比较大, 但本征电容 C_d 减小近一个数量级, 所以减小发射区面积是提高频率的主要措施. 测试时

振荡频率与所加的直流偏置电压有很大关系, 由(6)式可知, 影响频率参数有 R_s 、 R 和 C_d . 一般认为 R_s 和 C_d 是不随偏压变化, R 随偏压变化, R 在负阻区中存在一个最小值 R_{\min} , 而在峰、谷值附近 R 都变大, 当 $R = R_{\min}$ 时 f_R 出现最大值 $f_{R\max}$ 称为最大阻性截止频率^[7]. 令 $R = 1/G$, G 为负电导, 则有

$$f_R = \frac{1}{2\pi C_d} \left| \frac{|G|}{R_s} - G^2 \right|^{1/2} \quad (7)$$

上式对 G 取偏微分, 可知当 $G = (-2R_s)^{-1}$ 或 $R = -2R_s$ 时 $f_R \rightarrow f_{R\max}$

$$f_{R\max} = \frac{1}{4\pi C_d R_s} \quad (8)$$

(8) 式可以说明: 改变偏压可改变 G , 当 $G = (-2R_s)^{-1}$ 时, $f_{R\max}$ 只和 $C_d R_s$ 有关, 在实际情况出现 $R \gg R_s$, 提高 f_R 的途径是减小 C_d 、 R 和 R_s . 因此在材料和器件设计及制作中, 提高频率采取的措施如下:

(1) 减小串联电阻 R_s , 其中包括: (a) 采用肖特基 RTD(SRTD) 结构; (b) 设计 E 区掺杂偏重些, 减小电阻率; (c) 台面几何尺寸设计, 有利于减小 R_s ;

(d) 工艺中合金充分减小接触电阻或采用无合金工艺。

(2) 增大 G 或减小 R , 其中包括: (a) 减小势垒宽度 L_B ; (b) 在材料选择上, 用迁移率高的材料; (c) 适当提高 C 区掺杂浓度, 但应注意这与减小 C_d 矛盾。

(3) 减小电容 C_d , 其中包括: (a) 减小 E 区面积 A_E ; (b) 适当降低 C 区掺杂浓度; (c) 在 V_p 允许下略增加阱宽 L_W ; (d) 在结构上采用空气桥; (e) 使 Cr/Au 线条窄和厚, 把 SiO_2 或 Si_3N_4 绝缘隔离介质膜加厚。

5 结论

本文通过 HP8510C 网络分析仪对 RTD 进行频率特性测试, 采用单端口 S 参数对 RTD 频率特性进行分析。通过拟合提取等效电路参数, 得出器件的发射区面积对频率性能的影响。指出提高器件频率应采取的措施。通过测试外推得到, 我们所研制的器件阻性截止频率达 54GHz。

参考文献

[1] Bouregba R, Vanbesien O, Mounaix P, et al. Resonant tunnel-

ing diode as source for millimeter and submillimeter wavelengths. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1993, 41: 2025

- [2] 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
- [3] 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
- [4] Shimizu N, Nagatsuma T, Waho T, et al. In_{0.53}Ga_{0.47}As/AlAs resonant tunneling diodes with switching time of 1.5ps. Electron Lett, 1995, 31(19): 1695
- [5] Liang Huilai, Zhao Zhenbo, Guo Weilian, et al. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 23(1): 91[梁惠来, 赵振波, 郭维廉, 等. 半导体学报, 2001, 23(1): 91]
- [6] Sze S M. Semiconductor device physics. Beijing: Electronic Industry Press, 1981: 532[施敏(美). 半导体器件物理. 北京: 电子工业出版社, 1981: 532]
- [7] Brown E R, Goodhue W D, Sollner T C L G, et al. Fundamental oscillations up to 200GHz in resonant tunneling diode and new estimates of their maximum oscillation frequency from stationary-state tunneling theory. J Appl Phys, 1988, 64(3): 159

Frequency Characteristics and Analysis of Quantum Resonant Tunneling Diodes*

Zhang Shilin¹, Niu Pingjuan¹, Liang Huilai¹, Guo Weilian¹, Zhao Zhenbo¹,
Hao Jingchen², Wang Wenjun², Zhou Junming³ and Huang Qi³

(1 Academy of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(2 The 13th Institute, Ministry of Information Industry, Shijiazhuang 050051, China)

(3 Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Using a HP8510C network analyzer, S parameter of AlAs/InGaAs/AlAs resonant tunneling diodes (RTD) is measured. Through extracting the equivalent circuit parameters from curve fit, the resistive cut off frequency of the fabricated device is calculated(dc to 54GHz) and the factors of affecting frequency are analyzed.

Key words: resonant tunneling diodes (RTD); S parameter; frequency characteristics

EEACC: 2520D; 2560X

Article ID: 0253-4177(2002)11-1192-04

* Project supported by National Natural Science Foundation of China (No. 60177010), Natural Science Foundation of Tianjin (No. 013601411)

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

Received 25 February 2002, revised manuscript received 7 May 2002

© 2002 The Chinese Institute of Electronics