

# 双向负阻晶体管动态伏安特性的实验研究

周 旋 高广和

(中国科学院半导体研究所,北京) (华北电力学院研究生院,北京)

**摘要** 本文研究了双向负阻晶体管 (Bidirectional Negative Resistance Transistor, 简称 BNRT) 在张弛振荡电路中的动态伏安特性。借助动态伏安特性对 BNRT 张弛振荡电路的一些性质进行了分析。实验结果与计算结果一致。本文还对改进器件结构的设计,以便使器件达到更高的振荡频率提供了理论依据。

**关键词** 半导体器件;负阻器件;张弛振荡器

## 1. 引言

双向负阻晶体管 (BNRT) 是我国发明的一种新功能器件<sup>[1,2]</sup>, 已被广泛应用于脉冲电路中<sup>[2-6]</sup>。该器件具有图 1(a) 所示的合并晶体管结构, 其电路符号和近似等效电路如图 1(b) 和 1(c) 所示。

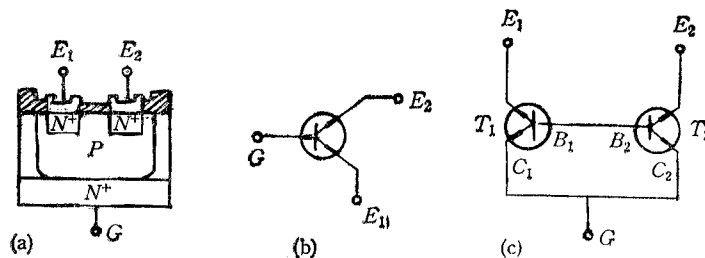


图 1 BNRT 的 (a) 基本结构 (b) 电路符号和 (c) 近似等效电路

BNRT 的两个输出电极  $E_1$  和  $E_2$  具有完全对称的性质,  $G$  为控制极。在控制极加电压控制信号  $V_g$ , 借此控制输出极  $E_1$  和  $E_2$  之间呈现的 S 型负阻特性。此外, 施加于电极  $E_2$  和  $E_1$  之间的电压极性可以互换, 而所得的负阻特性非常对称。我们对这个器件的特性和由它实现的基本电路进行了大量实验研究, 观察到许多用器件的直流伏安特性难以解释的非线性现象。为了深入研究这些现象, 对器件在特定电路中的动态伏安特性进行了实验和理论分析。从而可以有效地了解器件在动态运用时出现的一些现象。

## 2. 实验电路和波形

静态时, BNRT 具有如图 2 所示的双向 S 型伏安特性。实验样管的参数值是: 转

折电压  $V_S$  为 8—12V、转折电流  $I_S$  为 20—500 $\mu$ A、维持电压  $V_H \leq 2/3V_S$ 、维持电流  $I_H$  为 2—10mA、正阻区的微分电阻  $R_S$  为 10—15 $\Omega$ 、允许最大导通电流  $I_{FM}$  为 20—80 mA。

用 BNRT 实现的张弛振荡电路如图 3(a) 所示。适当地选择电源电压  $V_{EE}$  和电阻  $R_E$  之值,使直流负载线与负阻区交于一点(图 3(b) 中 P 点),并满足下列条件:

$$I_S < I'_S < I'_H < I_H$$

式中,  $I'_S = (V_{EE} - V_S)/R_E$ ,  $I'_H = (V_{EE} - V_H)/R_E$  时,图 3(a) 的电路就能连续地产生振荡。偏压电阻  $R_g$  不在振荡回路内,其对振荡频率和输出电平的影响可忽略。

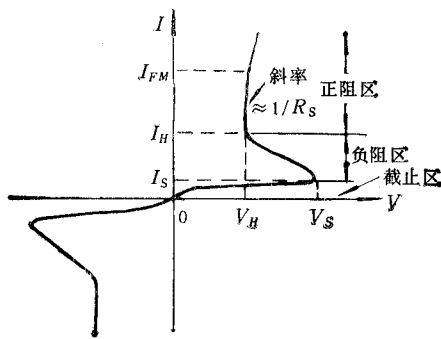


图 2 BNRT 的直流伏安特性(未按标度)

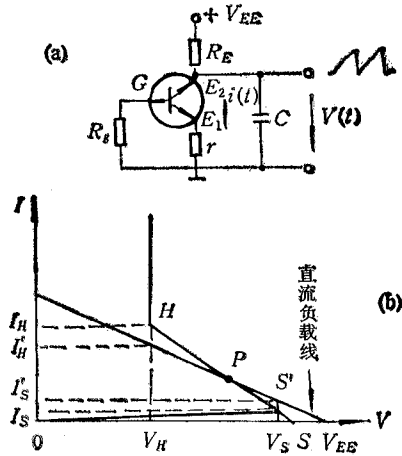


图 3 (a) BNRT 张弛振荡器 (b) 相应的直流负载线

从图 3(b) 可以看出,  $I'_H$  近似为电容  $C$  的初始充电电流,  $I'_S$  是电容  $C$  的最终充电电流。采用 BNRT-2C 型的管子,  $V_S = 11.4V$ 、 $V_H = 5.4V$ 、 $I_H = 5mA$ 、 $I_S = 50\mu A$ , 取  $V_{EE} = 17V$ 、 $C = 120pF$ 、 $R_E = 15k\Omega$ 、 $R_g = 300\Omega$ 、 $r = 5.1\Omega$ , 用示波器观察到的电容  $C$  上的电压波形为锯齿波,如图 4 照片所示。

从图 4 波形照片看出,动态运用时器件谷点电压接近零伏,它比静态时器件的维持电压值  $V_H$  小得多;而器件的转折电压  $V_S$  的值在动态时与在静态时相等。由此可见,器件动态运用时(即在张弛振荡过程中),电容  $C$  两端的电压跳变幅度大于由静态伏安特性曲线所决定的负阻区摆幅电压值 ( $V_S - V_H$ )。所以在分析器件动态运用性能时,就不能照搬器件静态伏安特性所对应的特征参数值。

### 3. 动态伏安特性曲线及其分析

所谓动态伏安特性,是指器件应用于实际电路时,流过器件的电流随器件端电压的变化规律。为了得到与图 3(a) 所示 BNRT 张弛振荡电路相应的器件动态伏安特性,首先利用示波器测量该电路中器件输出端电压波形  $V(t)$  和流过器件的电流  $i(t)$  的动态波形(通过测量小取样电阻  $r$  上的电压  $V_r = r \cdot i(t)$ ,可以推算  $i(t)$ ),如图 5 所示。然后根据图 5 所示器件输出端电压和电流随时间变化规律,用作图法画出器件的动态伏安特性曲线示于图 6。由图可见这条曲线大致可分成  $AB$ 、 $BC$ 、 $CD$ 、 $DE$ 、 $EA$  五段,每段基本

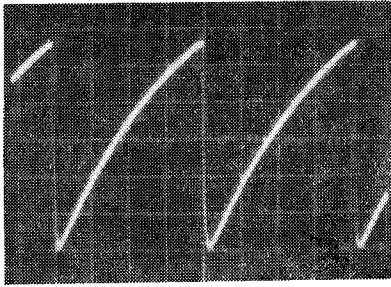


图4 振荡电压波形  
(Y:2V/格; X:0.5 $\mu$ s/格)

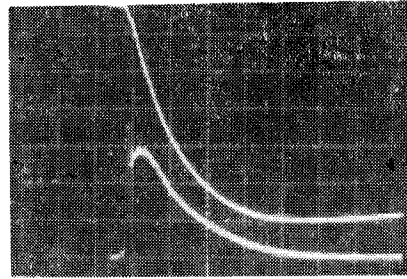


图5 动态波形  
上曲线: 电压(Y:2V/格; X:10ns/格)  
下曲线: 电流(Y:50mA/格; X:10ns/格)

上是线性的。参照文献[7]研究PNPN负阻激光器所用的方法,可对上述过程分析如下:

(1) *AB*段 *AB*和*BC*段连续构成负阻区。参看图3(a)所示张弛振荡电路和图1(c)所示BNRT的近似等效电路。从该等效电路可知,若 $E_1$ 接电源负极、 $E_2$ 接正极,则 $T_1$ 管处于正常工作方式, $T_2$ 管处于倒向工作方式(即发射极当集电极用,集电极当发射极用)。在 $T_2$ 管雪崩击穿的瞬时, $T_1$ 管处于放大状态, $T_1$ 管的发射结向基区注入大量的电子,使通过 $T_2$ 管击穿结(即 $E_2-B_2$ 结)的电流变大, $T_1$ 管的基极电流也相应增加,于是注入 $T_2$ 管的基区的电子更多,由此形成很强的正反馈,使 $T_1$ 管迅速进入饱和状态。上述过程对应于图6中*AB*段。这段雪崩过程极其迅速,主要取决于电流雪崩倍增因子 $M^{[8]}$ ,在实验中观测到这段时间仅约100ps。

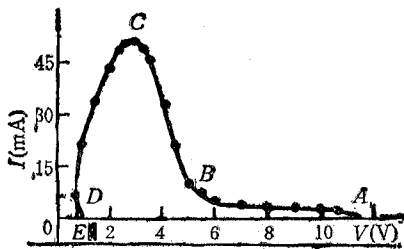


图6 器件动态伏安特性

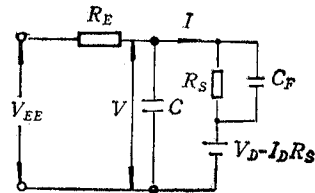


图7 器件放电过程的等效电路

(2) *BC*段 *BC*段是器件通过较大电流时连续构成的负阻区域。是器件第二次出现的负阻现象,它与器件内部结构和外电路参数有关。在BNRT张弛振荡电路中,当器件截止时,外接电容 $C$ 充有大量的电荷。器件一旦导通,电容要向器件注入很大的电流,从而通过 $T_2$ 管击穿结的电荷密度增加,当其电荷密度增大到与原来由杂质离子构成的空间电荷密度相比拟时,将引起击穿结内场分布的变化,击穿结电压随注入电流的增加而迅速减小,最后导致击穿结的结电压降低到很小的数值,所以第二次出现了负阻区域。该过程类似雪崩晶体管的二次击穿现象<sup>[9]</sup>,它也是一个快过程,实验中已观测到该过程持续时间短于10ns。

(3) *CD*段 *CD*段对应器件的放电过程。器件负阻特性结束,流过器件的电流已达最大值。图3(a)电路中,外接电容 $C$ 值等于30pF时,测得器件的最大电流值在30—50

mA 范围。由于器件通过如此大的电流，故在击穿结内形成大量载流子贮存。这种贮存效应对外可用结电容  $C_F$  等效。故器件的放电过程可用静态特性与器件的结电容  $C_F$  并联等效。器件放电过程的等效电路如图 7 所示。图中  $R_s$  是器件静态伏安特性曲线正阻区的微分电阻。根据图 8，可以直接写出下面的表达式：

$$\frac{V_{EE} - V}{R_E} - I = C \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

$$V = \left( I - C_F \frac{dV}{dt} \right) R_s + V_D - I_D R_s \quad (2)$$

从(1)和(2)式，可得以  $I$  为变量的电路方程：

$$\frac{dI}{dt} + \frac{I}{\tau_s} = \frac{I_D'}{\tau_s} \quad (3)$$

(3)式中， $\tau_s = R_E(C + C_F) // R_s(C + C_F)$ ，一般  $R_E \gg R_s$ ，故有

$$\tau_s \approx R_s(C + C_F) \quad (4)$$

$$I_D' = \frac{V_{EE} - V_D + I_D R_s}{R_E + R_s} \approx \frac{V_{EE} - V_D + I_D R_s}{R_E} \approx I_H' \quad (5)$$

器件放电时间为

$$T_{CD} = \tau_s \cdot \ln \frac{I_C - I_D'}{I_D - I_D'} \approx \tau_s \cdot \ln \frac{I_C - I_H'}{I_H - I_H'} \quad (6)$$

(4) DE 段 DE 段对应器件的恢复过程，即管子导通电流从维持电流值减小至截止漏电流值的过程。该过程所需时间  $T_{DE}$  主要由载流子寿命  $\tau_f$  决定，而  $\tau_f$  决定于器件工艺。由于采用金扩散，器件恢复过程较快，实验测得  $\tau_f \leq 30\text{ns}$ 。

(5) EA 段 EA 段对应器件的截止状态，在这个过程中里，通过器件的电流是微安级的截止漏电流。该过程所需时间  $T_{EA}$  由下式确定：

$$T_{EA} = R_E C \ln \frac{V_{EE} - V_E}{V_{EE} - V_A} \approx R_E C \ln \frac{V_{EE} - V_D}{V_{EE} - V_S} \quad (7)$$

实验发现， $V_E$  与  $V_D$  很接近， $V_E \approx V_D \approx 1\text{V}$ ； $V_A$  则与静态时器件的转折电压值  $V_S$  相等。

借助器件的动态伏安特性，可以很方便地分析张弛振荡器的周期(或频率)，只要将动

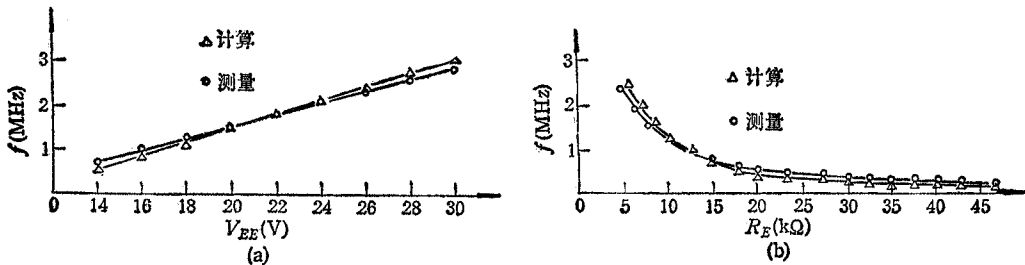


图 8 电路参数与振荡频率的关系

(a)  $V_{EE}-f$  ( $R_E = 7.5\text{k}\Omega$ ,  $C = 100\text{pF}$ ,  $V_S = 11.4\text{V}$ ,  $I_S = 50\mu\text{A}$ ,  $V_H = 5.4\text{V}$ ,  $I_H = 5\text{mA}$ ,  $C_F = 10\text{pF}$ )

(b)  $R_E-f$  ( $V_{EE} = 20\text{V}$ ,  $C = 100\text{pF}$ ,  $V_S = 12\text{V}$ ,  $I_S = 70\mu\text{A}$ ,  $V_H = 6\text{V}$ ,  $I_H = 7.2\text{mA}$ ,  $C_F = 10\text{pF}$ )

态伏安特性每段过程所需时间相加,便可计算出张弛振荡器的整个周期  $T$ :

$$\begin{aligned} T &= T_{AB} + T_{BC} + T_{CD} + T_{DE} + T_{EA} \approx T_{CD} + T_{EA} \\ &= R_S(C + C_F) \ln \frac{I_C - I_H}{I_H - I'_H} + R_E C \ln \frac{V_{EE} - V_D}{V_{EE} - V_S} \end{aligned} \quad (8)$$

(8)式表明,在张弛振荡电路中,  $R_E$  和  $C$  之值愈小, 振荡频率愈高; 在  $R_E$  和  $C$  取值一定时, 振荡频率随直流电压  $V_{EE}$  的增加而提高, 这一结论已得到实验证实。作为例子, 图 8 给出了  $V_{EE}-f$ 、 $R_E-f$  曲线的计算结果与实验结果, 二者符合较好。为进一步提高器件振荡频率, 应从改进器件内部结构着手, 降低转折电压  $V_S$  和增大维持电流  $I_H$ , 可以获得更高的振荡频率。

### 参 考 文 献

- [1] 李凤银、周旋、李锦林、曹体伦, 电子学报, 1984年, 第4期, 第112页。
- [2] 李凤银、周旋、李锦林、曹体伦, 半导体学报, 5(1984)6, 698—701。
- [3] 周旋、鲍秉乾, 电子科学技术, 15(1985)5, 4—7。
- [4] 余道衡, 电子科学技术, 17(1987)5, 33—36。
- [5] 裴留庆、郭汾、谢剑光, 自然数周期序列与混沌, 中国第七届电路与系统年会论文集, 1987年, 深圳, 第13—18页。
- [6] 余道衡、朱照宣, 电子科学学刊, 9(1987)2, 176—180。
- [7] Wang Shou-wu, et al., *PIEE*, 69(1981), 130—139。
- [8] J. Millman, H. Taub, *Pulse, Digital and Switching Waveforms*, McGraw-Hill Book Co. Chapter 6, (1965)。
- [9] 刘文生、李锦林, 取样技术原理与应用, 科学出版社, 1981年, 第153—156页。

## STUDY ON THE DYNAMIC $I$ - $V$ CHARACTERISTICS OF BNRT

Zhou Xuan

(*Institute of Semiconductors, Academia Sinica, Beijing*)

Gao Guanghe

(*Beijing Graduate School of North China Institute of Electric Power, Beijing*)

**Abstract** Experimental investigation was carried out for the dynamic  $I$ - $V$  characteristics of the bidirectional negative resistance transistor (BNRT) in the relaxation oscillation circuit. Some properties of the BNRT relaxation oscillation circuit were also analysed by means of the dynamic  $I$ - $V$  characteristics. Experimental results agree with the computations. The direction for improving the device design is also pointed out in order to enhance the oscillation frequency.

**Key words** Semiconductor devices; Negative resistance device; Relaxation oscillator