

双向负阻晶体管张弛振荡器的研究*

余道衡 朱照宣
(北京大学)

提 要

本文研究了双向负阻晶体管(BNRT)张弛振荡器的分段线性(具有四段折线和三段折线)动力学模型,给出了电路和动态方程,讨论了张弛振荡器的一些性质,实验结果与计算结果一致,表明这种动力学模型是适当而有效的。

1. 引言 双向负阻晶体管(BNRT, Bidirectional Negative Resistance Transistor)是辽宁朝阳无线电元件厂和中国科学院半导体所合作,在我国首创的一种新功能器件^[1,2],它具有可控S型负阻特性。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,观察到许多非线性现象。为了深入研究这些现象,首先建立了BNRT张弛振荡器的动力学模型,用三段折线^[3]和四段折线近似两种模型进行分析和计算。理论计算与实验结果符合得很好。

2. 器件及其特性 BNRT的电路符号如图1所示。电极 E_1 和 E_2 具有完全对称的性质,控制极 G 的电位 V_G 可以控制 E_1 与 E_2 之间呈现的S型负阻特性。当 V_G 固定时, E_1

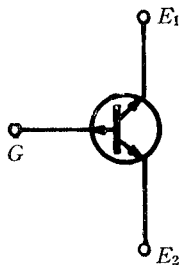


图 1

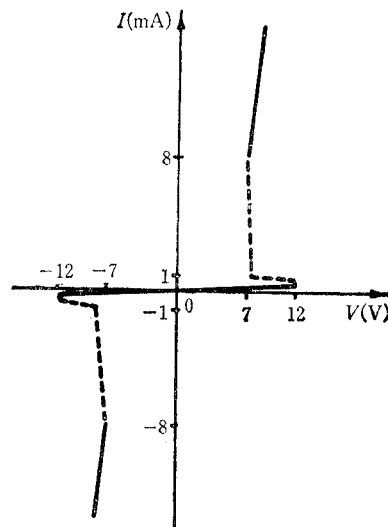


图 2

与 E_2 之间呈现的S型负阻特性就确定不变了。BNRT的静态伏安特性如图2所示。它

* 1985年12月19日收到,1986年6月18日修改定稿。

具有完全对称的特性, E_1 与 E_2 也可以互换而特性不变. 在使用时只有单个电源供电, 只考虑第一象限中的特性即可.

3. 张弛振荡电路 BNRT 实现的张弛振荡电路如图 3 所示. 电源电压 $E = 0-30V$ 可调; $C = 120PF$; $R = 7.5k\Omega$; $R_2 = 50\Omega$; $r = 10\Omega$; $R_g = 300\Omega$. 电路自激形成张弛振荡, a 点的输出电压 V 为负的锯齿电压; r 上的电压代表了电流波形; V_0 为负的尖脉冲电压, 其前沿可达 $1ns$, 频率为 $2MHz$, 在 50Ω 负载上输出电压达 $2V$.

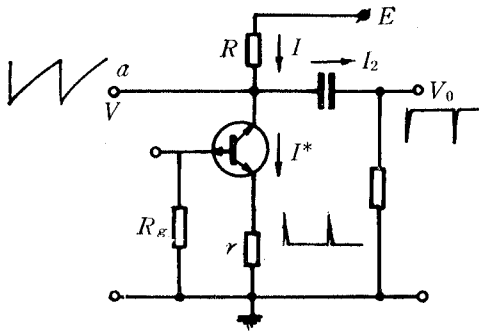


图 3

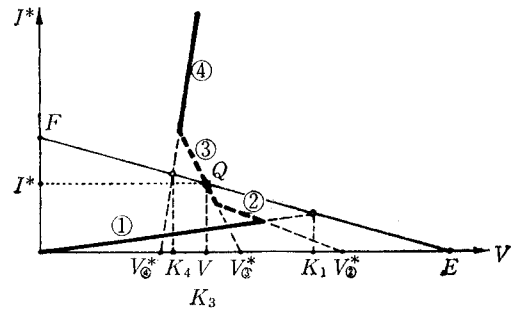


图 4

4. 电路动态方程 BNRT 用一个四段折线来描述它的负阻特性, 如图 4 所示. 图中线段①和④为正阻, 线段②和③为负阻. 由下列方程:

$$I = I^* + I_2, \quad (1)$$

$$I_2 = \frac{CD}{R_2 CD + 1} V \quad (2)$$

(式中 $D \equiv \frac{d}{dt}$, 是微分算符) 和

$$E = V + IR, \quad (3)$$

$$I^* = \frac{V - V^*}{R^*} \quad (4)$$

可以得到电路以 V 为变量的动态方程:

$$C \left[R_2 + \frac{1}{\frac{1}{R^*} + \frac{1}{R}} \right] \frac{dV}{dt} + V = \frac{E}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R^*}} + \frac{R_2 C E'}{R \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R^*} \right)}. \quad (5)$$

若电源电压不变时, $E' = \frac{dE}{dt} = 0$, (5) 式简化为:

$$C \left[R_2 + \frac{1}{\frac{1}{R^*} + \frac{1}{R}} \right] \frac{dV}{dt} + V = \frac{E}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R^*}}. \quad (6)$$

(5) 和 (6) 式对于 BNRT 工作在任一段折线上都是成立的, 只是其中 R^* 代表该段折线

上的电阻(折线①、④段上是正阻;折线②、③段上是负阻), V^* 代表折线各段与横轴的交点(参看图 4)。

5. 电压 $V(t)$ 的输出波形和 $V_0(t)$ 的确定 图 3 所示电路张弛振荡状态的动力学路线(dynamic route)如图 5 的 ABCDA'(A' 即 A) 所示。图中 BC 和 DA' 为快过程, 跳变时间由 BNRT 的特性决定, 大约为 1ns 左右。过程 AB 由方程

$$\tau_1 \frac{dV_1}{dt} + V_1 = K_1 \tag{7}$$

描述, τ_1 和 K_1 由图 4 中折线①段的值确定, (7) 式的解为:

$$V_1(t) = E_A + (K_1 - E_A) \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]. \tag{8}$$

$V_1(t)$ 如图 6 中的 AB 段所示, 过程 CD 由方程

$$\tau_4 \frac{dV_4}{dt} + V_4 = K_4 \tag{9}$$

描述。 τ_4 和 K_4 由图 4 中折线段④的值确定。(9) 式的解为:

$$V_4(t) = K_4 + (E_C - K_4) \exp\left(-\frac{t}{\tau_4}\right). \tag{10}$$

$V_4(t)$ 的曲线由图 6 中的 CD 段所示, 过程 BC 和 DA' 都是由 BNRT 负阻特性决定的快

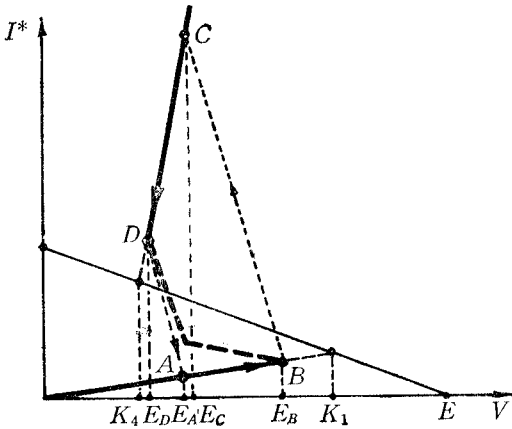


图 5

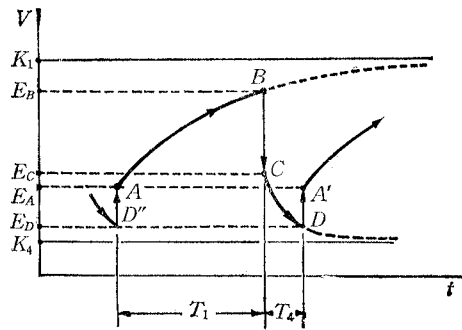


图 6

过程(与雪崩效应的电流倍增因子 M 有关, M 愈大, 过程愈快, 大约为 0.1ns 的量级)。 $V(t)$ 电压波形的周期

$$T \approx T_1 + T_4 = C \left\{ [R_2 + (R_1^* // R)] \ln \frac{K_1 - E_A}{K_1 - E_B} + [R_2 + (R_4^* // R)] \ln \frac{E_C - K_4}{E_D - K_4} \right\}, \tag{11}$$

式中

$$K_1 = \left(\frac{E}{R} + \frac{V_1^*}{R_1^*} \right) / \left(\frac{1}{R_1^*} - \frac{1}{R} \right),$$

$$K_4 = \left(\frac{E}{R} + \frac{V_4^*}{R_4^*} \right) / \left(\frac{1}{R_4^*} + \frac{1}{R} \right).$$

对于实际的 BNRT, R_1^* 很大, 可看作 $R_1^* \rightarrow \infty$; R_4^* 很小, 可看作 $R_4^* \rightarrow 0$, $T_4 \rightarrow 0$, 因此

$$T \approx T_1 = C(R_2 + R) \ln \frac{E - E_A}{E - E_B} \quad (12)$$

$V_0(t)$ 由下列方程确定:

$$V_0(t) = \frac{R_2 CD}{R_2 CD + 1} V(t), \quad (13)$$

式中 $D = \frac{d}{dt}$ 是微分算符, $V_0(t)$ 的解是近似的负尖脉冲。

6. BNRT 张弛振荡电路的电流波形 根据 (1)、(2)、(3) 和 (4) 式可以推出以电流 I^* 为变量的动态微分方程:

$$C(R_2 + R^*) \frac{dI^*}{dt} + I^* = \frac{E - V^*}{R + R^*} + \frac{R_2 C}{R + R^*} \frac{dE}{dt} \quad (14)$$

同电压方程一样, R^* 和 V^* 相应于图 4 中四段折线的各自的参数。电流波形也由图 5 的动力学路线 $ABCD A'$ 决定, 与图 5 对应的电流波形画于图 7。

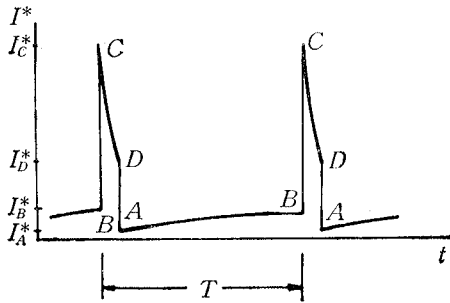


图 7

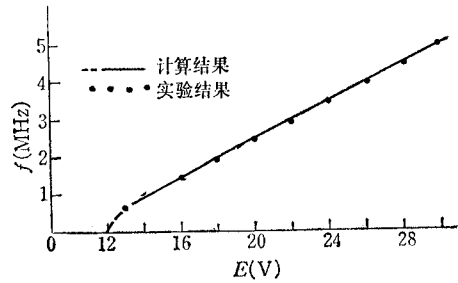


图 8

7. 结束语 当电压波形与电流波形只与图 4 中①、④两段折线正阻特性有关时, 四段折线模型与三段折线模型没有区别, 但在以下条件下, 则必须用四段模型描述。

- (1) 电源 E 较高、电阻 R 较大, 静态工作点处在折线的②线段上;
- (2) R_2 较大, 使得③线段在方程中的 R_0 表现为正阻, 即

$$R_0 = R_2 + \frac{1}{\frac{1}{R_3^*} + \frac{1}{R}} > 0 \quad (15)$$

为了讨论电路中各元件参数对其频率 f 的影响, 分别计算和测量了 $R-f$ 、 $C-f$ 、 R_2-f 、 $E-f$ 曲线, 也测量了 R 、 R_2 、 C 、 E 对输出幅度、脉冲前沿的影响, 实验结果与理论计算一致。计算时选用的数据为: $R_1^* = \infty$ 、 $R_2^* = -4500\Omega$ 、 $R_3^* = -70\Omega$ 、 $R_4^* = 12\Omega$ (由 BNRT 实测数据定出)。图 8 仅画出了该电路中大家感兴趣的 $E-f$ 压控特性的理论计算结果与实验结果, 两者也符合较好。

参 考 文 献

- [1] 李凤银等,电子学报, 12(1984), 110.
[2] 李凤银等,半导体学报, 5(1984), 698.
[3] 山本外史,パルスとデジタル回路,理工学社, (1978), 103—109.

A RESEARCH ON THE RELAXATION OSCILLATOR WITH BNRT

Yu Daoheng

(Department of Radio Electronics, Beijing University)

Zhu Zhaoxuan

(Department of Mechanics, Beijing University)

In this paper a piecewisely linear (with three or four segments) dynamic version for the relaxation oscillations in a circuit with Bidirectional Negative Resistance Transistor (BNRT) is studied. The circuit and the dynamic equations are given and some properties of the relaxation oscillations are discussed. Experimental results agree with the computations, showing that the dynamic model is adequate and useful.