

三端双向负阻晶体管的模拟与实验^{*}

莫太山 张世林 郭维廉 梁惠来 毛陆虹 郑云光

(天津大学电子信息工程学院 微电子系, 天津 300072)

摘要: 对双向负阻晶体管(BNRT)的三端特性进行了研究。根据器件模拟得到了器件内部电势和电场分布, 解释了 S 型负阻特性产生机理。分别从模拟和实验得到了输出负阻曲线随控制极电压变化的情况, 结果表明, 随控制电压的增大, 转折电压、转折电流和维持电压均增大。模拟结果和实验结果一致。BNRT 的三端化实现, 克服了两端应用的诸多缺点, 大大增加了它在高速脉冲电路中的应用灵活性。

关键词: 双向负阻晶体管; 三端; S 型负阻; 器件模拟

PACC: 2550; 2550X; 0290

中图分类号: TN 323⁺. 6 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2004)08-0986-05

1 引言

双向负阻晶体管(bidirectional negative resistance transistor, BNRT)自 1984 年李凤银等人提出后^[1], 作为一种有广阔应用前景的高速 S 型负阻开关器件, 在器件设计、模拟、工作原理和应用等各方面得到了广泛而深入的研究^[2~4]。但直到现在, 这些研究都仅限于两端, 即控制端电压为零的情况下。BNRT 作为两端应用, 存在以下缺点: (1) 输出电压摆幅小; (2) 参数不易调节; (3) 输出、输入之间隔离困难; (4) 和其他器件联用困难。如果将衬底作为控制极在其上施加一电压控制信号, 将它变成三端器件, 便可克服上述这些缺点。通过改变控制极上的偏压, 可方便地控制输出极 E₁ 和 E₂ 之间呈现的 S 型负阻特性, 大大增加了它在电路中应用的灵活性。因此, 有必要专门对控制极电压对 BNRT 内部物理量及 S 型负阻特性曲线的具体影响进行研究。本文在前人诸多研究的基础上, 首先通过器件模拟得到了控制端电压非零条件下 BNRT 内部电势和反偏结电场(直接影响到雪崩倍增)分布情况, 进而根据这些结果分段讨论了 BNRT 工作机理。此外, 还模拟得到了不同控制电压条件下的 I-V 特性曲线。

2 三端 BNRT 的器件结构和模型

图 1 示出了三端 BNRT 剖面结构图。它是由一个横向晶体管和两个纵向晶体管集成的复合晶体管结构。在这种复合晶体管结构中, 三个晶体管有公共的 p 型基区, 两个纵向晶体管有公共的 n⁺集电区及两个完全对称的发射区。两个输出电极 E₁, E₂ 从对称的两个发射区顶部引出, 而控制极 C 由公用的集电区底部引出。工作时, E₁ 接正电压, E₂ 接地, E₁, E₂ 之间呈现 S 型负阻特性。E₁, E₂ 极性互换, 所得负阻特性完全对称, 表现出其双向性。调节控制极 C 上电压, 可使转折电压、转折电流、维持电压、维持电流等主要特性参数发生改变, 从而可以控制 E₁, E₂ 之间 S 型负阻特性。

在 BNRT 版图制作过程中, 将两个重掺杂发射区的距离设计的较远, 一般应大于载流子扩散长度, 所以横向 n⁺pn⁺ 晶体管作用很弱。为了简化分析, 可将它的影响忽略, 但应将基区电阻 R_b 的影响考虑进来。下面将会看到, R_b 在 BNRT 负阻产生过程中起着重要的作用。n⁺集电区掺杂浓度很高, 所以它的横向寄生电阻也可忽略。做了这些近似处理后, 可

* 国家重点基础研究发展计划资助项目(批准号: 2002CB311905)

莫太山 男, 1979 年出生, 硕士, 主要从事 SiGe 光电探测器及负阻器件研究工作。

2003-08-10 收到, 2003-10-31 定稿

©2004 中国电子学会

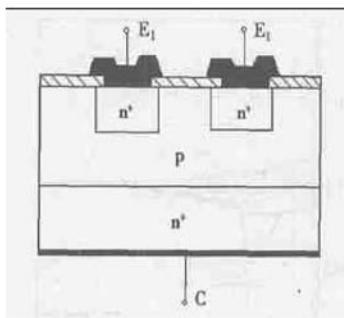


图 1 三端 BNRT 剖面结构示意图

Fig. 1 Cross-section schematic of three terminal BNRT

将三端 BNRT 等效为图 2 所示的器件模型。

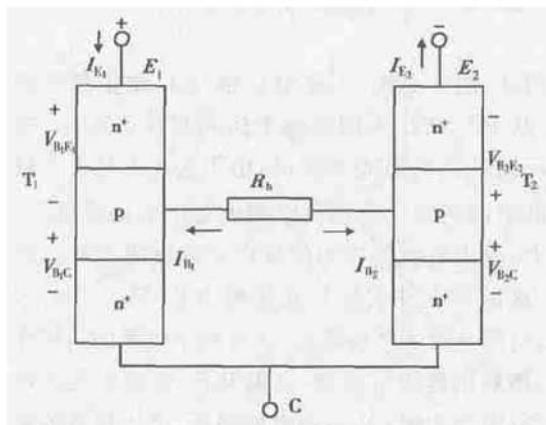


图 2 三端 BNRT 器件模型

Fig. 2 Device modeling of three-terminal BNRT

3 器件模拟结果与分析

3.1 三端 BNRT 产生 S 型负阻曲线的工作机理

模拟使用 SILVACO 公司的器件模拟软件包 ATLAS 进行二维数值模拟。模拟中选取的 BNRT 纵向掺杂浓度分布示于图 3。图中坐标原点选为发射区表面，方向指向衬底。纵向掺杂的各个扩散层均为高斯分布。几何参数选取如下：发射区横向尺寸 $5\mu\text{m}$ ，发射结结深 $5\mu\text{m}$ ，两个发射区之间间隔 $30\mu\text{m}$ ；基区宽度 $2\mu\text{m}$ ，集电结结深 $7\mu\text{m}$ ，集电区纵向尺寸 $6\mu\text{m}$ 。模拟过程中，控制电极 C 加偏压 0.5V ，改变 $V_{E_1E_2}$ ，得到的 BNRT S 型负阻特性曲线如图 4 所示。该特性曲线可分为三个区域：截止区(OB 段)、负阻区(BD 段)、正阻区(DE 段)。下面将结合模拟结果分段讨论 BNRT 处在不同工作区时物理过程。

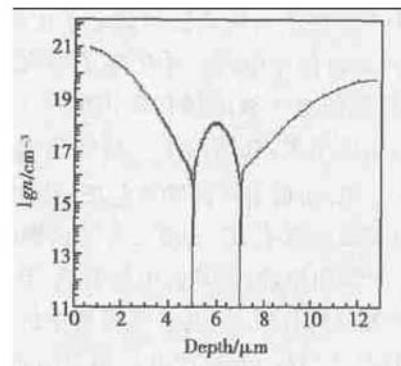
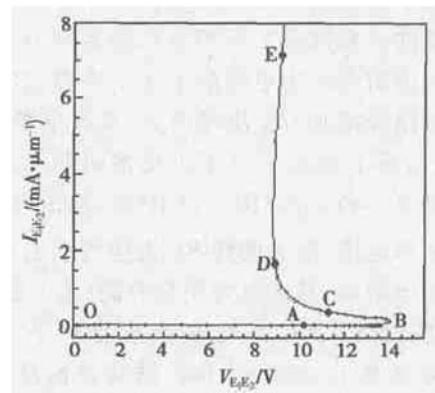
图 3 T₁, T₂ 管纵向掺杂浓度分布Fig. 3 Doping profile throughout T₁ and T₂

图 4 BNRTS 型负阻特性曲线

Fig. 4 S type negative resistance characteristic of BNRT

(1) 截止区

魏希文等人^[2]通过实验测试指出，在两端情况下(即 $V_C = 0$)，不论器件处于截止态还是导通态， T_1 管一直处于反向有源状态(B_1C 结作为发射结正偏， B_1E_1 结作为集电结反偏)， T_2 管一直处于饱和态。但当 $V_C = 0.5\text{V}$ 时， T_1 , T_2 管工作状态发生了改变。当 $V_{E_1E_2}$ 较小时(OA 段)，一方面，由 B_1C 结注入到基区并被 B_1E_1 空间电荷区收集的电子很少；另一方面，反偏 B_1E_1 空间电荷区电场较低(图 5 曲线 a)，雪崩倍增因子 M ^[5,6] 很小，使流经场区载流子通过碰撞电离产生的电子空穴对很少，可忽略不计，故这时流经基区电阻电流很小，基区横向压降很小，基区电势很低(图 6 曲线 a)，这就使得 B_1C 结、 B_2C 结反偏。因此，此时 T_1 管处于截止态， T_2 管处于正向放大状态。随着 $V_{E_1E_2}$ 的逐渐增大(AB 段)， B_1E_1 空间电荷区电场迅速增加， M 值相应迅速增大，使得从 B_1C 结耗尽区产生并注入到基区的载流子流经 B_1E_1 结

强场区时,通过碰撞电离产生的电子空穴对显著增加。倍增产生的电子被电场扫向正电极 E_1 ,使外部电流 $I_{E_1 E_2}$ 明显增大,在输出 $I-V$ 特性曲线上表现为曲线开始上翘。而倍增空穴则被电场扫回中性基区,形成横向基极电流 I_B , I_B 必然会在基区横向电阻 R_B 上产生一个横向压降,使基区电势升高,且基区电势横向分布为左高右低。这就是三极管中的基区电阻自偏压效应^[7,8]。这一效应使 B_1C 结趋向正偏,即 T_1 管逐渐导通, B_2E_2 结正偏增大,导致 T_2 管 B_2E_2 结注入到基区并被 B_2C 集电极收集的载流子增加,这部分载流子经公共 n^+ 集电区流入 T_1 管,并和增加的 B_1C 结注入载流子一起经基区输送到 B_1E_1 空间电荷区雪崩倍增产生更多的电子空穴对。这反过来又使基极电流增加, R_B 压降增大,基区电势进一步升高。这实际上形成了一个正反馈机制^[9]。最终当 $V_{E_1 E_2}$ 达到某一值(对应图 4 点 B)时,峰值电场增大到击穿临界电场(图 5 曲线 b),发生雪崩击穿,使雪崩电流急剧增加,基区电势明显升高(图 6 曲线 b)。观察发现,此时 B_1C 结势垒高度已由 A 点时的 0.98V 降低至 0.23V,而 B_2C 结势垒高度降低至 0.56V(受篇幅所限不再给出 T_2 管各区电势分布图),均低于模拟中选取浓度下 PN 结内建电势 0.78V。因此 B_1C 结、 B_2C 结均已正偏,表明 T_1 管由截止态进入反向有源态, T_2 管由正向放大态进入饱和态。

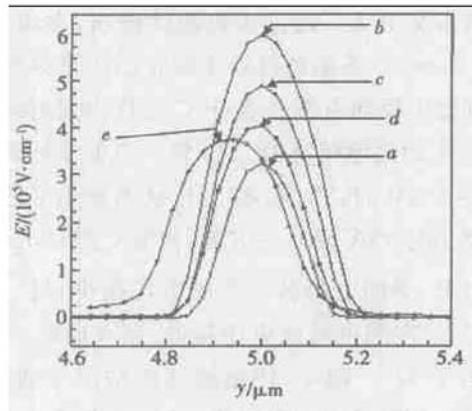


图 5 B_1E_1 空间电荷区电场分布(B_1E_1 结在 5μm 处)

Fig. 5 Electric field distribution in B_1E_1 space charge region B_1E_1 junction is at 5μm.

(2) 负阻区

击穿后,输出电流 $I_{E_1 E_2}$ 急剧增加。基区电势也迅速增加(图 6 曲线 c),使 B_1C 结、 B_2C 结正偏继续增

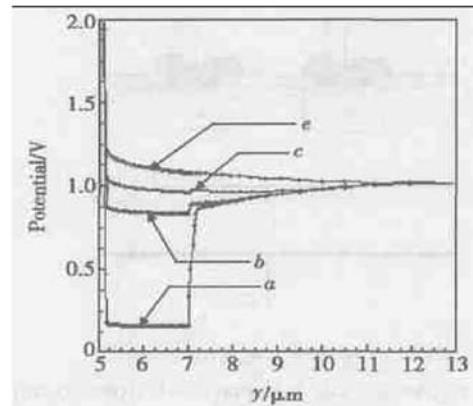


图 6 T_1 管基区与集电区纵向电势分布(B_1C 结在 7μm 处)

Fig. 6 Vertical potential distribution in base and collector of T_1 . B_1C junction is at 7μm.

强,从 B_1C 结注入的载流子达到高注入水平,在通过反偏 B_1E_1 空间电荷区时,由于这些大量可动载流子的电荷调制效应而使空间电荷区电场降低^[10,11]。再者,输出电流的增加使横向基区电阻上的压降增大,这同样会使实际加在反偏 B_1E_1 结上的电压降低,空间电荷区电场降低。在这两个因素的共同作用下,随输出电流的增加,反偏 B_1E_1 空间电荷区电场降低(图 5 曲线 c),两端电压降低,产生显著的负阻现象。

(3) 正阻区

当输出电流 I_{E_1} 增加到某一临界值(对应图 4 点 D),发生基区扩展效应^[12]。随着 $I_{E_1 E_2}$ 进一步增大,基区边界逐渐向发射区移动,峰值电场也向发射区内移(图 5 曲线 e),峰值电场有所减小,但空间电荷区显著展宽。其结果是电场在展宽的空间电荷区内的积分增大,即反偏 B_1E_1 结两端电压增大, $I-V$ 曲线恢复到正阻特性。

综上所述,三端 BNRT 的双向 S 型负阻特性是晶体管雪崩击穿、基区电阻自偏压效应、纵向晶体管双向注入和放大、电荷调制效应、基区扩展效应综合作用的结果。

3.2 S 型负阻特性曲线随控制极电压 V_c 的变化情况

图 7 示出了 V_c 分别为 0.1, 0.4, 0.8, 1.3V 四种情况下模拟得到的输出特性曲线。从图中可以看出,随着控制极电压增大,转折电压、转折电流及维持电压均增加,表现为负阻特性曲线右移,转折点上

翘愈加明显,但负阻摆幅变化不明显。

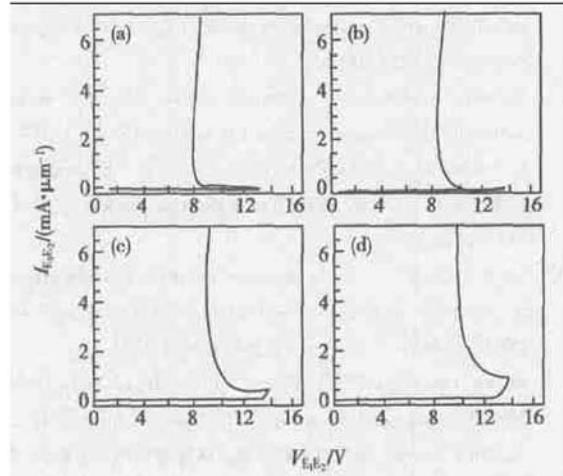


图 7 模拟得到的负阻特性随 V_C 变化情况 (a) $V_C = 0.1V$; (b) $V_C = 0.4V$; (c) $V_C = 0.8V$; (d) $V_C = 1.3V$

Fig. 7 Negative resistance characteristic versus V_C obtained by simulation

4 实验结果及与模拟结果的比较

图 8 是我们实验拍摄的制作样管在不同 V_C 下的输出特性曲线。由图可见,它与模拟得到的 S 型负阻特性曲线随 V_C 变化情况是完全一致的。转折电压和转折电流随 V_C 增大而增大的原因解释如下: V_C 越大, T_1 管处截止区 OA 段时 B_1C 结反偏越严重, 因此, $V_{E_1E_2}$ 进入 AB 段后为了使 B_1C 结能够正偏, 并最终在正反馈作用下发生雪崩击穿, 就需要更高的临近击穿时的基区电势, 这就要求在基区横向电阻上压降越大, 需临近击穿时因碰撞电离倍增产生的流向基区的空穴电流越大, 所以转折电流也就越大。而要增大因碰撞电离倍增产生的空穴电流, 需使反偏 B_1E_1 空间电荷区电场增强来增大倍增因子 M , 这就迫使击穿时的 $V_{E_1E_2}$ 移向更高的数值, 以增大降落在反偏 B_1E_1 结的偏压, 来增强空间电荷区电场。

5 结论

对三端 BNRT 进行了数值模拟和实验研究。根据模拟得到的不同工作阶段反偏 B_1E_1 结空间电荷区电场和基区电势分布情况, 解释了其双向 S 型负阻特性产生机理是晶体管雪崩击穿、基区电阻自偏压效应、纵向晶体管双向注入和放大、大电流注入效

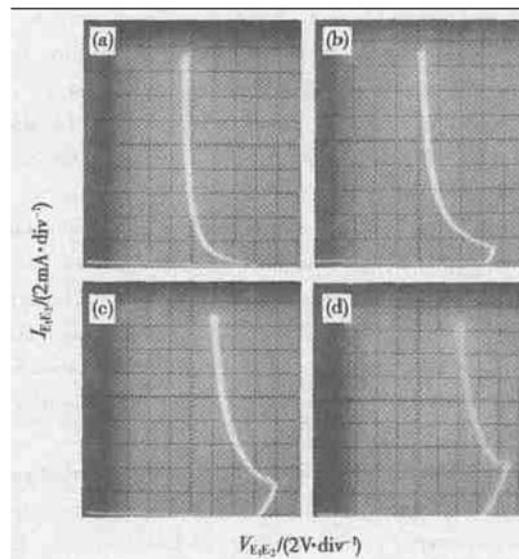


图 8 实验拍摄的输出特性曲线随 V_C 变化情况 (a) $V_C = 0.1V$; (b) $V_C = 0.4V$; (c) $V_C = 0.8V$; (d) $V_C = 1.3V$

Fig. 8 Output characteristic versus V_C photoed by experiment

应、基区扩展效应综合作用的结果。分别从模拟和实验获得了输出负阻特性曲线随控制电压的变化情况, 两者得到的结果完全一致, 随控制电压的增大, 转折电压、转折电流和维持电压均增大, 表现为输出特性曲线右移, 击穿点上移。BNRT 的三端化实现, 克服了两端器件应用中的诸多缺点, 由于控制极电压对输出 S 型负阻曲线的可调性, 大大增加了它在高速脉冲电路中的应用灵活性。

参考文献

- [1] Li Fengyin, Zhou Xuan, Li Jinlin, et al. A new semiconductor switching device with bidirectional negative resistance characteristic. Acta Electronica Sinica, 1984, 12(4): 110 (in Chinese) [李凤银, 周旋, 李锦林, 等. 双向负阻晶体管, 一种新的半导体开关器件. 电子学报, 1984, 12(4): 110]
- [2] Wei Xiwen, Wang Meitian, Li Jianjun, et al. Study of duo-transistor negative resistance device. Acta Electronica Sinica, 1995, 23(2): 74 (in Chinese) [魏希文, 王美田, 李建军, 等. 双管 S 型负阻器件的研究. 电子学报, 1995, 23(2): 74]
- [3] Li Jianjun, Wei Xiwen, Wang Meitian, et al. Numerical analysis of bidirectional negative resistance device. Acta Electronica Sinica, 1996, 24(2): 66 (in Chinese) [李建军, 魏希文, 王美田, 等. 双向负阻器件的数值模拟. 电子学报, 1996, 24(2): 66]
- [4] Zhang Fubin, Li Jianjun, Wei Xiwen. Two-dimensional numerical simulation of bi-directional S' type negative resis-

- tance device. Chinese Journal of Semiconductors, 1997, 18(4): 302(in Chinese)[张富斌, 李建军, 魏希文. 双向 S 型负阻器件的二维数值模拟方法及模拟结果分析. 半导体学报, 1997, 18(4): 302]
- [5] Kloosterman W J, De Graaff H C. Avalanche multiplication in a compact bipolar transistor model for circuit simulation. IEEE 1988 Bipolar Circuits & Technology Meeting, 1988: 103
- [6] Zanoni E, Crabbe E F, Stork J M C, et al. Extension of impact-ionization multiplication coefficient measurements to high electric fields in advanced Si BJT's. IEEE Electron Device Lett, 1993, 14(2): 69
- [7] Chin T Y, Tien P K, Sung J, et al. A new analytical model and the impact of base charge storage on base potential distribution, emitter current crowding and base resistance. IEEE IEDM, 1992: 573
- [8] Verzellesi G, Turetta R, Pavan P, et al. Extraction of DC base parasitic resistance of bipolar transistors based on impact-ionization-induced base current reversal. IEEE Electron Device Lett, 1993, 14(9): 431
- [9] Zanoni E, Crabbe E F, Stork J M C, et al. Measurements and simulation of avalanche breakdown in advanced Si bipolar transistors. IEEE IEDM, 1992: 927
- [10] Verzellesi G, Baccarani G, Canali C, et al. Prediction of impact-ionization-induced snap-back in advanced Si n-p-n BJT's by means of a nonlocal analytical model for the avalanche multiplication factor. IEEE Trans Electron Devices, 1993, 40(12): 2296
- [11] Lu P F, Chen T C. Collector-base junction avalanche effects in advanced double-poly self-aligned bipolar transistors. IEEE Trans Electron Devices, 1989, 36(6): 1182
- [12] Zhang Pingying, Zhou Youmo. Principle of transistors. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publisher, 1992: 132(in Chinese)[张屏英, 周佑模. 晶体管原理. 上海: 上海科技出版社, 1992: 132]

Simulation and Experimental of Three-Terminal Bidirectional Negative Resistance Transistor^{*}

Mo Taishan, Zhang Shilin, Guo Weilian, Liang Huilai, Mao Luhong and Zheng Yunguang

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

Abstract: Three terminal characteristics of negative resistance transistor (BNRT) is investigated. According to the electric field and potential distribution in the device obtained by device simulation, the mechanism inducing the 'S' type negative resistance characteristics is explained. In addition, the dependence of output negative resistance curve on controlled voltage is analyzed both experimentally and by numerical simulation. Results indicate that snapback voltage, snapback current and sustaining voltage increase as controlled voltage increases. Simulated and experimental results agree well. The realization of three-terminal BNRT overcomes many shortcomings presented in its two terminal application, thus it can increase the flexibility in the high-speed pulse circuit application greatly.

Key words: BNRT; three terminals; 'S' type negative resistance; device simulation

PACC: 2550; 2550X; 0290

Article ID: 0253-4177(2004)08-0986-05

* Project supported by National Key Basic Research Program of China(No. 2002CB311905)

Mo Taishan male, was born in 1979, master candidate. He is engaged in the research on SiGe photodetector and negative resistance device.

Received 10 August 2003, revised manuscript received 31 October 2003

©2004 The Chinese Institute of Electronics