

# 光电双向负阻晶体管的数值模拟与实验研究

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:** 光电双向负阻晶体管(PBNRT)是一种新型 S 型光电负阻器件. 本文对它的光电负阻特性进行了数值模拟和实验研究, 给出了器件等效电路. PBNRT 在光电混合工作模式下具有光控电流开关效应, 可通过光照和控制电压两种控制方式改变器件的 S 型负阻特性. 模拟和实验结果均表明: 光照强度增大, 维持电压基本保持不变, 转折电压减小, 负阻电压摆幅减小; 而增大控制电压, 维持电压和转折电压均增大, 输出负阻特性曲线右移. 上述特点使得 PBNRT 可望在光电开关、光控振荡和光电探测等方面有很好的应用前景.

**关键词:** 光电双向负阻晶体管; S 型光电负阻; 光控电流开关; 数值模拟

**中图分类号:** TN364<sup>+</sup>. 3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 037222112(2004)081260204

## Numerical Simulation and Experimental Study of Photo Bidirectional Negative Resistance Transistor

MO Tai2shan, ZHANG Sh2lin, GUO We2lian, LIANG Hu2lai, MAO Lu2hong, ZHENG Yun2guang  
(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The photo bidirectional negative resistance transistor (PBNRT) is a novel / S 0 type photoelectric negative resistance device. Its photoelectric negative resistance characteristics were investigated both by experiment and numerical simulation and its equivalent circuit is proposed. PBNRT has photo controlled current switching effect in the optical and electric mixed operating mode, and its / S 0 negative resistance characteristics can be modulated by two different controlled ways, using light and controlled voltage respectively. The simulated and experimental results both indicate that on increasing optical intensity, sustaining voltage almost remains unchanged and snapback voltage decreases, thus reducing the negative resistance voltage range; while as controlled voltage increases, sustaining voltage and snapback voltage both increase accordingly, and output negative resistance characteristic curve shifts right. All the properties mentioned above make it suitable for photoelectric switching, photo controlled oscillation and photoelectric detector.

**Key words:** PBNRT; / S 0 type photoelectric negative resistance; photo controlled current switching; numerical simulation

### 1 引言

光电双向负阻晶体管 PBNRT (Photo bidirectional negative resistance transistor) 是在电注入双向负阻晶体管 BNRT<sup>[1,2]</sup> (Bidirectional negative resistance transistor) 基础上演变而来, 能通过光照改变其负阻特性的一种新型光电负阻器件.

它的特点表现为: (1) 兼有光敏和负阻双重特性; (2) 具有 S 型光电负阻特性; (3) 光电性能具有多样性; (4) 工作在光电混合模式下, 可通过改变光照和第三端控制电压两种方式改变它的负阻特性, 工作方式灵活; (5) 结构简单, 与双极集成电路工艺兼容. 由于具有上述特点, 可望在光电开关、光控振荡和光电探测等方面有很好的应用前景. 因此有必要对其进行深入研究. 本文首先简要介绍了电注入 BNRT 的结构、等效电路及 S 型负阻产生原理. 在此基础上, 给出了工作在光电混

合模式下 PBNRT 的器件结构和等效电路. 采用器件模拟软件 ATLAS 模拟了 PBNRT 的光控电流开关效应, 并分别对光照强度和控制电压对其 S 型光电负阻特性的具体影响进行了分析, 结果表明光照效果与控制电压对负阻特性改变具有相反的现象. 最后, 对制作的样管进行了前面几项特性的测试, 并与模拟结果进行了对比. 实验结果和模拟结果一致.

### 2 电注入 BNRT 的 S 型负阻特性

由于电注入 BNRT 的 S 型负阻特性是光电混合模式 PBNRT 光控 S 型负阻特性的物理基础, 故先简单介绍一下 BNRT 的机构及其 S 型负阻产生机理, 作为研究 PBNRT 的出发点.

BNRT 的剖面结构如图 1(a) 所示. 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. 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<sup>+</sup> 集电区及两

个完全对称的发射区. 两个输出电极  $E_1$ 、 $E_2$  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,  $E_1$  接正电压,  $E_2$  接地,  $E_1$ 、 $E_2$  之间呈现 S 型负阻特性.  $E_1$ 、 $E_2$  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、维持电压等主要特性参数发生改变, 从而可以控制  $E_1$ 、 $E_2$  之间 S 型负阻特性. BNRT 两个重掺杂发射区的距离间距较大, 一般应大于载流子扩散长度, 所以寄生横向  $n^+pn^+$  晶体管的影响可以忽略, 但应将基区体电阻  $R_B$  的影响考虑进来.  $n^+$  集电区掺杂浓度很高, 所以它的横向寄生电阻也可忽略. 作了这些近似处理后, 可给出 BNRT 的等效电路如图 1(b) 所示.

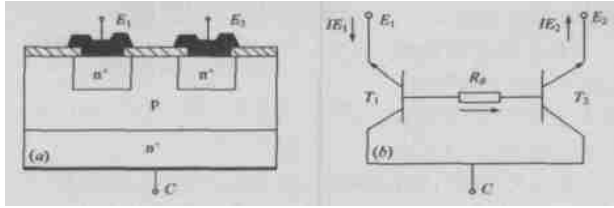


图 1(a) BNRT 结构剖面图 图 1(b) BNRT 等效电路

在某一固定  $V_C$  下, 端电流  $I_{E_1E_2}$  随端电压  $V_{E_1E_2}$  变化曲线示于图 2, 呈现明显的 S 型负阻特性, A 点对应的电压称为转折电压, B 点对应的电压称为维持电压, 负阻电压摆幅  $\Delta V = V_A - V_B$ . 现在分析其产生机理. 当  $V_{E_1E_2}$  较小时, 由于控制电压  $V_C$  的存在,  $B_1C$ 、 $B_2C$  结均处于反偏状态, 此时由于  $T_1$  管截止, 不会与  $T_2$  发生正反馈作用. 但随着  $V_{E_1E_2}$  的逐渐增大, 反偏  $B_1E_1$  结空间电荷区电场迅速增加, 使得雪崩倍增因子  $M^{[3]}$  迅速增大. 自反偏  $B_1C$  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  $I_{E_1E_2}$  增大, 而倍增空穴则被电场扫回中性基区, 形成横向基极电流  $I_B$ ,  $I_B$  必然会在基区体电阻  $R_B$  上产生一个横向压降, 使基区电势升高, 且基区电势分布并不均匀, 左高右低. 这就是三极管中的基区电阻自偏压效应<sup>[4]</sup>.

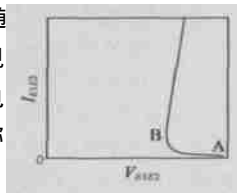


图 2 BNRT 输出负阻特性曲线

这一效应使  $B_1C$  结逐渐正偏, 即  $T_1$  管逐渐进入导通状态,  $B_2E_2$  结正偏增大, 这使得  $T_2$  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  $n^+$  集电区流入导通的  $T_1$  管, 使  $T_1$  管产生增强的雪崩倍增效应,  $B_1E_1$  空间电荷区碰撞电离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, 导致碰撞电离产生的电子空穴对数迅速增加, 基区电势迅速增加,  $B_1C$  结、 $B_2E_2$  结正偏继续增强, 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<sup>[5]</sup>, 两端电压降低, 产生显著的负阻现象. 当输出电流  $I_{E_1E_2}$  继续增加到某一临界值, 峰值电

场开始向发射区内移, 峰值电场虽进一步减小, 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,  $I_{E_1E_2}$  曲线恢复到正阻特性.

### 3 PBNRT/ S0型负阻特性的数值模拟与分析

#### 3.1 PBNRT 器件结构及等效电路

模拟使用 SILVACO 公司推出的器件模拟软件包 ATLAS, 进行的是二维数值模拟. 模拟输出的 PBNRT 结构示于图 3(a), 各区的尺寸已示于图中. 与 BNRT 相比, 基本上一样, 只是将受光  $pn$  基- 集结面积增大, 以提高收集光子数目, 增大光电灵敏度. 其相应的等效电路见图 3(b). 受光  $pn$  结看作是一光电流为  $I_{PHB}$  的光电二极管和一结电容  $C_j$  的并联. 需要指出的是, 由于进行的是二维数值模拟, 且为了更明显观察 PBNRT 的光电特性随外部条件的变化规律, 模拟中器件所采用的参数与实际制作参数并不完全相同, 故后面给出的模拟结果与制作样管的实验结果是定性对应关系.

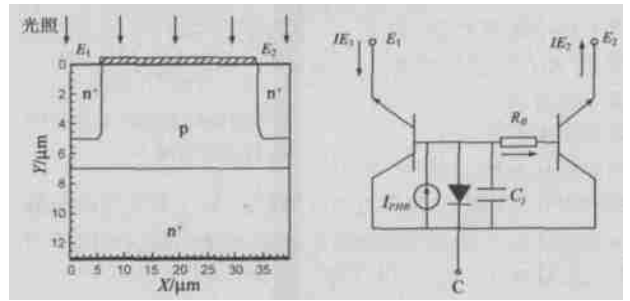


图 3(a) 模拟 PBNRT 二维结构图 图 3(b) PBNRT 等效电路图

#### 3.2 PBNRT 的光控电流开关效应及光强对负阻特性的影响

如图 4(a) 所示,  $V_C = 0$ ,  $V_{E_1E_2}$  略小于导通电压(约为 13.1V)时, 若无光照, 则器件处于高阻态. 如果用光强为  $0.01W/cm^2$  的光照射, 则电流  $I_{E_1}$  突然增大, 变为导通状态, 如图 4(b). 发生这种效应的原因如下: 在入射光照作用下, PBNRT 公共集电结耗尽区产生大量光生载流子, 光生电子经外电路抽走, 光生空穴则注入基区, 横向流动构成  $T_1$ 、 $T_2$  管的有效基极电流. 在基极体电阻产生压降, 基区电势升高. 可见, 光生载流子与碰撞电离产生的电子空穴对的作用是一样的.

光生载流子的存在促进了  $T_1$  管的导通, 使得  $T_1$  管导通所需要的碰撞电离电流减小, 意味着  $T_1$  管导通所需的  $B_1E_1$  结空间电荷区电场减小, 即所需的外加电压  $V_{E_1E_2}$  减小.  $T_1$  管导通后, 便在与  $T_2$  管正反馈作用下使基区电势迅速增加,  $B_1C$  结、 $B_2E_2$  结正偏迅速增强, 使得自  $B_1C$  结注入  $B_1E_1$  结空间电荷

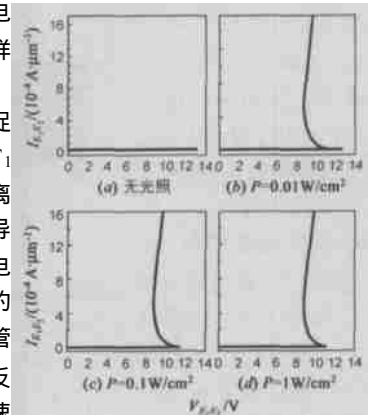


图 4 模拟得到的 PBNRT 光控电流开关效应及光强对负阻特性的影响

区的载流子达到高注入水平从而产生负阻,端电流迅速增加,整个器件开启.随着光强的增大,如图4(c)、(d)所示,公共集电结耗尽区产生的光生载流子就越多,产生的附加基极电势越高, $T_1$ 管导通对外加电压的要求就越低,产生负阻所对应的转折电压就越小,而维持电压基本不变,负阻的电压摆幅 $\$ V$ 减小.

### 3.1.3 控制电压 $V_C$ 对 PBNRT- S 型负阻特性的影响

无光照时,对  $V_C = 0, 1V, 0.5V, 0.8V, 1.0V$  四种控制电压条件进行了模拟,得到的结果如图5所示.可见,随着控制电压  $V_C$  的增大,维持电压和转折电压均增大,表现为曲线右移.转折电压之所以增大,是因为  $V_C$  越大,  $B_1C$  结反偏越严重,为了能让  $B_1C$  结正偏而使  $T_1$  管导通并最终在与  $T_2$  正反馈作用下发生负阻所需要的基区电势就越高,碰撞电离电流就越大,这就迫使外加电压  $V_{E_1E_2}$  移向更高数值,来增强反偏  $B_1E_1$  结空间电荷区电场,增大雪崩倍增因子  $M$ ,以增大碰撞电离产生的电子空穴对数.

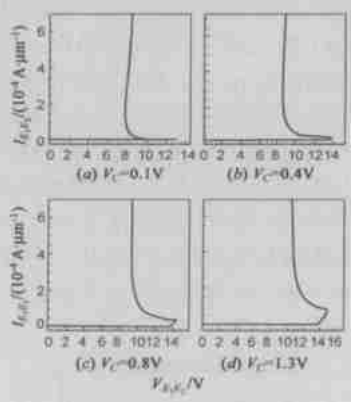


图5 模拟得到的PBNRT负阻特性随  $V_C$  变化情况

## 4 实验结果及与模拟结果的比较

### 4.1 PBNRT 的光控电流开关效应及光强对负阻特性的影响

实验中 PBNRT 接收的光照由一发光二极管 LED 提供,通过改变 LED 电流强度来改变输入光功率.实验中,仅对输出量与 LED 电流强度关系进行测量.因为整个测量过程中管芯与 LED 距离保持不变,所以 PBNRT 接收的光功率与 LED 电流有着——对应的关系.测量结果示于图6.

图6(a)中,  $V_{E_1E_2}$  略小于导通对应电压(约 7.3V)时,如无光照则为高阻态.如用发光二极管在  $I_{LED} = 0, 95mA$  时用光照射,  $I_{E_1E_2}$  突然增大,变为导通状态,如图6(b).逐渐增大 LED 电流,如图6(c)、(d),即增大 PBNRT 输入光功率,器件维持电压基本保持不变,而转折电压逐渐减小,负阻电压摆幅  $\$ V$  减小,与图4得到的模拟结果一致.

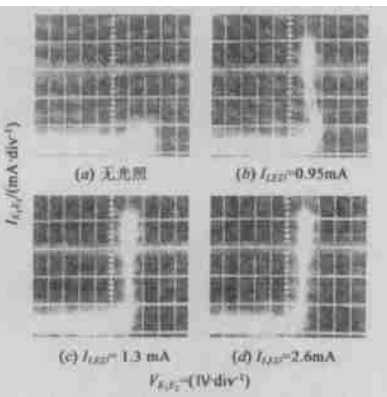


图6 实验拍摄的PBNRT的光控电流开关效应及光强对负阻特性的影响

### 4.2 控制电压 $V_C$ 对 PBNRT- S 型负阻特性的影响

图7是在无光照,不同  $V_C$  条件下拍摄的输出特性曲线的照片.从图中可以看出,随着控制电压  $V_C$  的增大,器件的维持电压和转折电压均增大,输出负阻特性曲线右移,与图5模拟得到的结果也是一致的.

### 4.3 光照效果与控制电压增大对负阻特性改变相反的现象

无论从前面的模拟还是实验结果来看,增大光强和控制电压对 PBNRT 负阻特性的改变都是相反的.这可很容易从前面提到的外加条件使  $T_1$  管导通,进而在与  $T_2$  管正反馈作用下产生负阻原理得到解释.光强增大,基区附加电势升高,降低了  $B_1C$  结的势垒高度,促进了  $T_1$  管的导通,使得与纯电注入时相比,负阻得以提前发生.而控制电压的增大,却使  $B_1C$  结的势垒高度进一步提升,截止程度进一步加剧,即阻碍了  $T_1$  管的导通,为了使  $T_1$  管导通,迫使外加电压  $V_{E_1E_2}$  移向更高数值,在  $I_{E_1E_2} - V_{E_1E_2}$  输出特性曲线上表现出与光强增大相反的现象.该现象的存在使得我们可以根据实际情况的需要,灵活选择器件的光电控制方式.

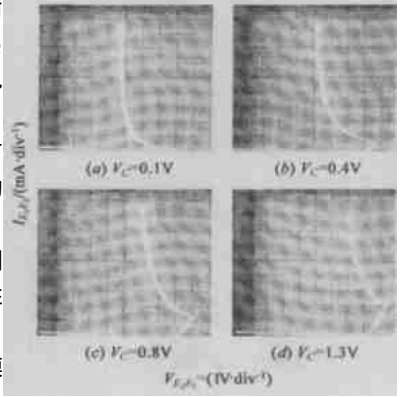


图7 实验拍摄的输出特性曲线随  $V_C$  变化情况

## 5 结论

如前所述, PBNRT 在光电混合工作模式下,具有光电 S 型负阻和光控电流开关效应.可通过光照和控制电压两种控制方式改变器件的 S 型负阻特性,分别通过数值模拟和实验详细分析了它们对 PBNRT 输出负阻特性的具体影响.模拟和实验结果均表明,随着光照强度的增大,维持电压基本保持不变,而转折电压逐渐减小,导致负阻电压摆幅减小,而若增大控制电压,维持电压和转折电压均增大,输出负阻特性曲线右移.利用电注入 BNRT 产生 S 型负阻的原理和光生载流子产生的附加基区电势相结合,可以说明上述的各种现象. PBNRT 光电功能的多样性,使其在光电开关、光控振荡和光电探测等方面有广阔的应用前景.

### 参考文献:

[1] 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[J].电子学报,1984,12(4):110.  
 [2] 李凤银,周旋,李锦林,等.一种新颖的负阻开关器件双向负阻晶体管[J].半导体学报,1984,5(6):698-701.  
 [3] Enrico Zanoni, Emmanuel F Crabbe, et al. Extension of impact ionization multiplication coefficient measurements to high electric fields in advanced Si BJT. s[J]. IEEE Electron Device Letters, 1993, 14(2): 69-71.  
 [4] Giovanni Verzellesi, Roberto Turetta, Paolo Pavan, et al. Extraction of

DC base parasitic resistance of bipolar transistors based on impact ionization-induced base current reversal [J]. IEEE Electron Device Letters, 1993, 14(9): 431.

[ 5 ] Giovanni Verzellesi, Giorgio Baccarani, Claudio Canali, et al. Prediction

of impact ionization induced snapback in advanced Si npn BJTs by means of a nonlocal analytical model for the avalanche multiplication factor [J]. IEEE Trans on Electron Devices, 1993, 40(12): 2296-2300.

#### 作者简介:



莫太山 男, 1979 年生于山东省临沂市, 2001 年毕业于天津大学电信学院微电子专业, 现为该专业硕士研究生, 目前参与 SiGe 光电探测器及光电负阻器件研究工作。



张世林 男, 1953 年生于辽宁省大连市, 1983 年天津大学半导体物理与器件物理专业硕士研究生毕业, 现为天津大学电子科学与技术系副研究员, 主要从事半导体新型器件的研究工作。