

# 双向 S 型负阻器件的二维数值模拟 方法及模拟结果分析\*

张富斌 李建军 魏希文

(大连理工大学物理系 大连 116023)

**摘要** 本文介绍了一种对双向 S 型负阻器件(BNRD)进行二维数值模拟的方法, 并用此方法模拟得出了器件的  $I-V$  曲线及截止状态和导通状态下器件的内部电位分布、电子空穴浓度分布和电流密度分布。由此可以更清楚地了解器件的工作机理。此外还对不同结构、工艺参数的 BNRD 进行了模拟, 总结出了器件结构、工艺参数对器件电学特性的影响关系。

EEACC: 2560Z, 0290

## 1 引言

双向 S 型负阻器件(BNRD)<sup>[1]</sup>作为我国首创的多功能高速脉冲器件有着非常广泛的应用前景。它具有振荡频率高、输出摆幅大、制作工艺简单等优点。关于该器件产生负阻的原因已经有了一定的理论分析<sup>[2]</sup>。但是, BNRD 器件工作过程中内部雪崩产生项显著, 二维效应明显, 因此本文通过一种简单实用的方法对该器件进行了计算机二维数值模拟, 一方面得到其  $I-V$  特性曲线及主要区段器件内部各物理量(电位、电流密度、电子空穴浓度)的二维分布图象, 并在此基础上对该器件的工作机理进行了分析。另一方面还对不同结构, 工艺参数的 BNRD 器件进行了模拟, 总结出器件各种结构、工艺参数对器件电学特性的影响, 为器件的优化设计提供了依据。

## 2 器件模型

### 2.1 模型方程

双向 S 型负阻器件<sup>[1]</sup>可以看成是一个横向 NPN 晶体管和两个纵向 NPN 晶体管构成,

\* 国家自然科学基金资助项目

张富斌 男, 1970 年生, 硕士研究生, 主要从事半导体器件的计算机模拟

李建军 男, 1966 年生, 讲师, 主要从事新材料和新器件的计算机模拟

魏希文 女, 1936 年生, 教授, 主要从事新材料在半导体器件中的应用和物理方面的研究

1996 年 4 月 1 日收到初稿, 1996 年 9 月 12 日收到修改稿

且三个晶体管具有公共基区(P区),两个纵向NPN晶体管具有公共集电区(N<sup>++</sup>区),其结构如图1所示。因此该器件二维效应显著,并且在其工作过程中载流子的产生-复合项起着关键性的作用。在器件模型中必须同时考虑两种载流子的运动过程,以及它们的产生-复合作用。对其进行模拟需要求解的二维稳态载流子运动基本方程为:(本文方程均已归一化,详细请见文献[3])

$$\nabla^2\Phi(x,y) = n(x,y) - p(x,y) - N(x,y)$$

其中:

$$N(x,y) = N_D(x,y) - N_A(x,y) \quad (1)$$

$$\nabla J_n(x,y) - R(x,y) + G(x,y) = 0 \quad (2)$$

$$\nabla J_p(x,y) + R(x,y) - G(x,y) = 0 \quad (3)$$

$$J_n(x,y) = \mu_n(x,y)[\nabla n(x,y) - n(x,y)\nabla\Phi(x,y)] \quad (4)$$

$$J_p(x,y) = \mu_p(x,y)[\nabla p(x,y) - p(x,y)\nabla\Phi(x,y)] \quad (5)$$

## 2.2 边界条件

根据双向S型负阻器件结构的特点,将边界条件划分为两类:固定边界条件和浮置边界条件。且忽略金属半导体之间功函数差、半导体表面复合及半导体表面的固定电荷。(1)在固定边界上(欧姆接触边界),载流子满足电中性和热平衡关系;(2)在浮置边界上,在垂直于边界方向上电场分量为零,电子空穴浓度梯度也为零。

## 3 二维数值模拟方法

目前对于具有S型负阻特性半导体器件的二维计算机数值模拟还没有一个简单实用的方法。本文根据S型负阻的特点,采用电压控制模型和有限差分法开发的硅器件二维数值模

拟软件,对双向S型负阻器件进行模拟,取得了较好结果,如图2所示,并获得了关键参数对器件特性的影响。对于图1所示对称结构的双向负阻器件,采用耦合法(即泊松方程和电流连续性方程同时求解)进行模拟,非线性方程组的求解采用牛顿-SLOR法<sup>[3]</sup>。

首先计算偏压为零时器件内部各物理量的初值。然后,通过逐渐增加端电压可以模拟I-V曲线OA段(如图2所示),此过程中由于电流很小且变化不大,数值计算收敛较快。在A点状态下如果再增加偏压,器件的电流将从A点跃至B点,此时A点电压即为转折电压,此过程中器件内部物理量变化十分剧烈,为保证数值计算稳定

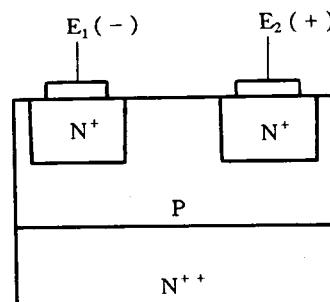


图1 BNRD器件二维结构图

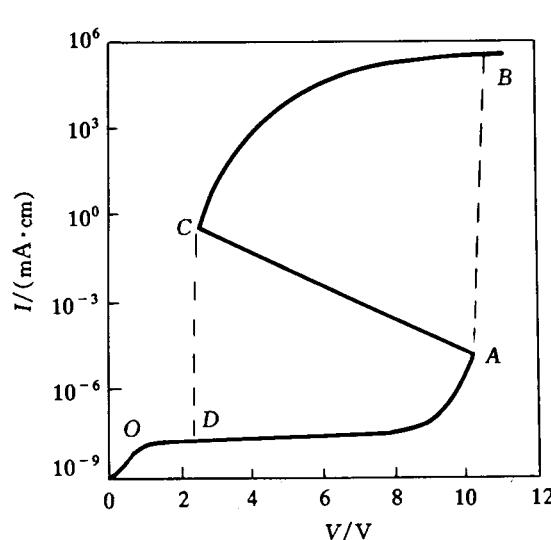


图2 双向负阻器件I-V曲线

收敛,求解线性方程组的 SLOR 法中松弛因子取 0.01. 然后从 B 点开始通过逐渐减小端电压,可以模拟得到从 B 点到 C 点的 I-V 曲线. 此段曲线的模拟计算中松弛因子取 1.0~1.2. 得到 C 点状态后,再减小偏压,器件电流将从 C 点跃至 D 点,此过程中松弛因子仍取 0.01. 于是得到器件 I-V 曲线. 器件的所有稳态电学参数:转折电压(A 点对应电压)、谷点电压(C 点对应电压)、负阻摆幅(A,C 两点电压差)、维持电流(C 点对应电流)和转折电流(A 点对应电流)都可以从曲线中得到.

## 4 模拟结果及讨论

采用上述方法,对具有图 1 所示结构的 BNRD 器件进行计算机数值模拟得到如图 2 所示的 I-V 特性曲线. 通过计算,可以得到器件 I-V 曲线 OA 段和 BC 段每点对应状态下器件的物理量具体分布. 图 3 给出了截止状态下  $V=8.59V$  时器件内部的电子浓度分布图象(受篇幅所限不再给出电位、空穴浓度的具体分布图). 得出如下结论: 器件在截止状态下,所加高偏压几乎全部降在反偏结上,而另外两个 PN 结处势垒区的电位分布非常接近零偏平衡态.

图 4 给出了导通段 BC 中  $V=3.1V$  时器件内部的电子浓度分布. 由图可见,靠近正电位电极  $E_2$  的 PN 结为反向抽取,靠近接地电极  $E_1$  的 PN 结为正向注入,这与文献[2]给出的实验数据是一致的. 与截止状态相比,最大的区别是导通状态下 P 型区的电位显著提高了. P 区内少数载流子电子的浓度远大于截止态,这主要是由于  $E_1$  极  $N^+$  区的注入引起的.

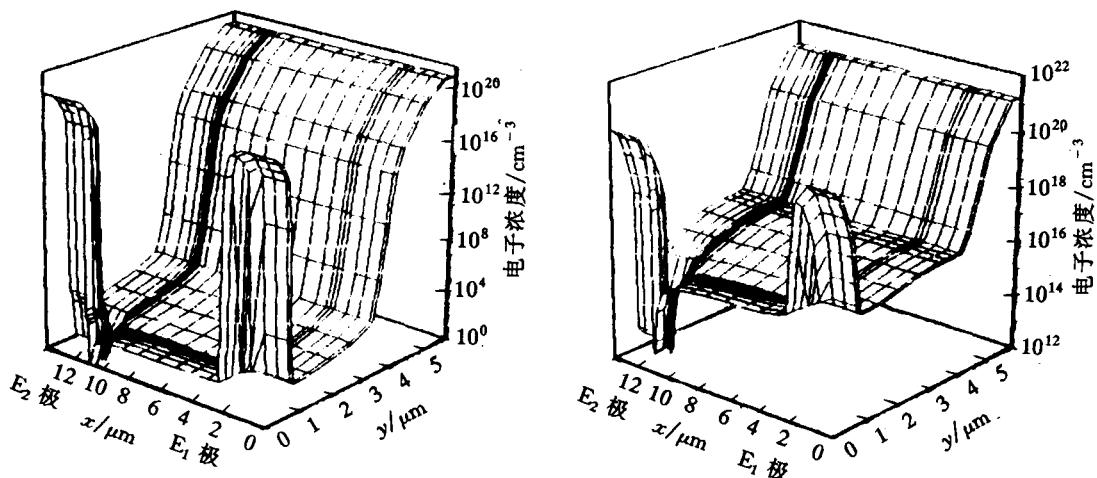


图 3 器件的电子浓度分布( $V=8.59V$ )

图 4 器件的电子浓度分布( $V=3.1V$ )

通过二维数值模拟还可以得到器件内部电流密度的分布图象. 图 5 给出导通段  $V=3.1V$  时器件内部电流密度分布. 其中图 5(a)为各原始网格点上电流密度矢量的方向分布,图 5(b)为各原始网格点上电流密度矢量的绝对值分布. 由图 5(a)可以看出电流基本上是从高电压端  $E_2$  流向低电压端  $E_1$ . 从图 5(b)中可以看出器件内部电流主要集中的区域,其中靠近  $E_1$  和  $E_2$  电极附近有两个尖峰(电流集中区域),在 P 区和衬底间势垒层的中部有一电流密度谷底(电流密度相对较小),因此器件的电流大致上可以分成两路:(1)由  $E_2$  通过 P 区表

面层流到  $E_1$ 。(2)电子由  $E_1$  的  $N^+$ 区注入到 P 区并扩散到高电导率的  $N^{++}$ 衬底区,然后再注入到 P 区并被  $E_2$  极的  $N^+$ 区抽走。而且从图 5(b)还可以看出在两路电流中电流主要从高掺杂的  $N^{++}$ 型浮置衬底通过,这说明此器件的横向 NPN 晶体管作用较弱。

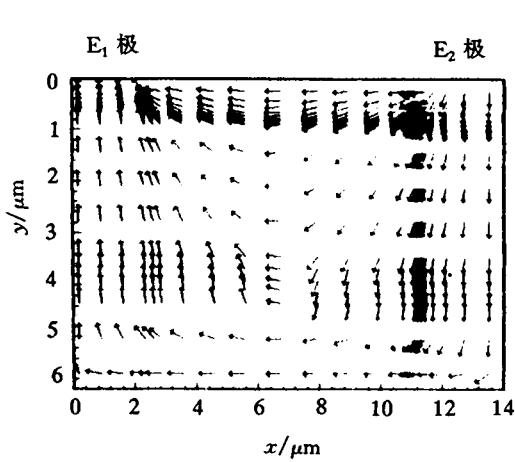


图 5(a) 器件的电流密度方向分布( $V=3.1V$ )

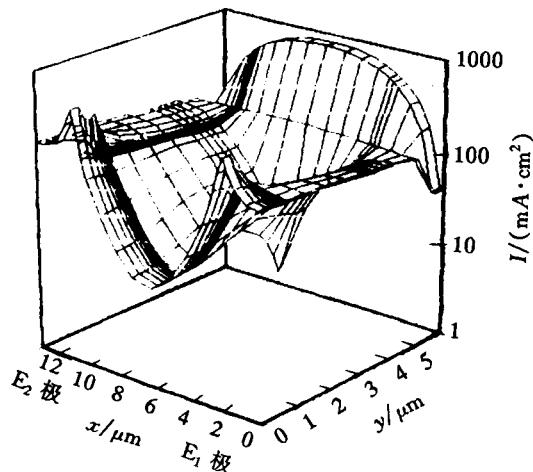


图 5(b) 器件的电流密度幅值分布( $V=3.1V$ )

在了解了 BNRD 器件工作机理后,通过对不同结构、工艺参数的 BNRD 进行计算机模拟,可以找出器件结构参数对器件电学特性的影响。本文选择 BNRD 器件较重要的五个结构参数进行对比模拟。在其它参数固定的情况下,通过改变其中一个参数,分别得到器件的  $I-V$  特性曲线,这样就可以直观地得到该结构参数对器件电学特性的影响。

#### 4.1 两发射区扩散窗口间距 $D$ 对 BNRD 特性的影响

两个 BNRD 器件,除  $D$  不同外,其它结构参数均相同,其  $I-V$  曲线如图 6(a)中 1,2。其中曲线 1 对应器件的  $D$  为  $4\mu m$ ,而曲线 2 的  $D$  为  $8\mu m$ 。这样由图就可以直观地看出  $D$  对器件特性的影响:随着  $D$  的减小,器件负阻摆幅增加。而从截止到负阻区的转折电压基本没有变化。因此负阻摆幅的增加主要来自维持电压的减小。转折电流和维持电流变化不大。

#### 4.2 发射区表面浓度 $N_{ES}$ 对 BNRD 特性的影响

两个 BNRD 器件,只有  $N_{ES}$  参数不同,其  $I-V$  曲线如图 6(a)中 2,3。其中曲线 2 对应器件的  $N_{ES}$  为  $2.0 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ ,曲线 3 对应器件的  $N_{ES}$  为  $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。从图中看出曲线 3 几乎是曲线 2 向高偏压方向的平移,因此  $N_{ES}$  降低使 BNRD 器件的转折电压略有升高,同时维持电压也有所升高。 $N_{ES}$  降低使 BNRD 的反偏 PN 结的击穿电压升高,而使正偏 PN 结的发射效率降低,于是得到如上结果。

#### 4.3 高阻外延层的存在对 BNRD 特性的影响

图 6(b)中曲线 1,4 对应的两个 BNRD 器件,除曲线 1 对应器件在 P 区和高掺杂衬底之间存在  $1\mu m$  厚的低掺杂外延层,两器件其它结构参数相同。图 6(a)中曲线 4 和图 6(b)中曲线 4 为同一器件的  $I-V$  特性曲线。从图中可以看出高阻外延层的存在使器件的负阻摆幅减小,其原因是:器件在导通状态时,高掺杂衬底起到电子由  $E_1$  极到  $E_2$  极输运过程的中继作用,即靠近  $E_1$  极区域抽取电子,靠近  $E_2$  极区域发射电子,这一点可以从图 4 中清楚地看到。然而高阻外延层的存在削弱了高掺杂衬底的这一作用。因此在确定 BNRD 制造工艺时为获

得较大的负阻摆幅,应精确地控制 P 区的扩散,使其能恰好地靠近高掺杂衬底. 这一点在工艺中已经得到了证实.

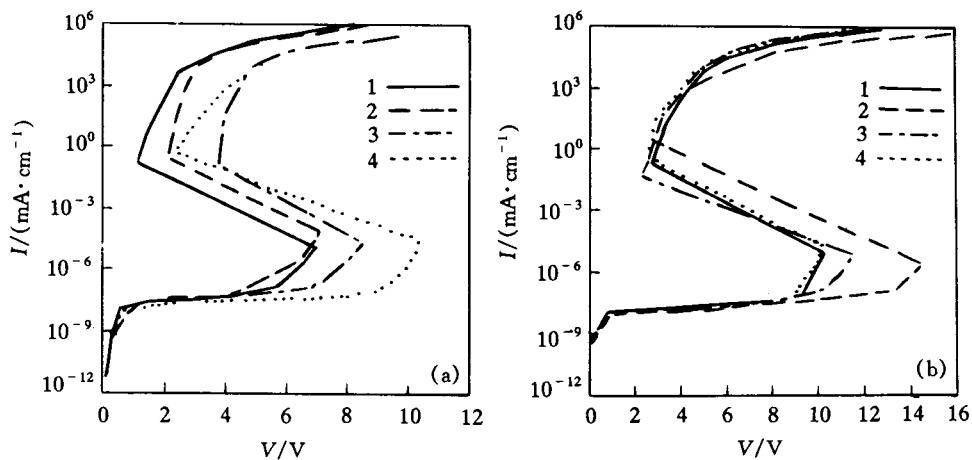


图 6 BNRD 结构参数对其  $I$ - $V$  曲线的影响

#### 4.4 基区(P 区)表面杂质浓度 $N_{PS}$ 对 BNRD 特性的影响

两个 BNRD 器件只有  $N_{PS}$  不同, 其  $I$ - $V$  曲线如图 6(b) 中 2、4, 其中曲线 4 对应器件的  $N_{PS}$  为  $2.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , 而曲线 2 对应器件的  $N_{PS}$  为  $8.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . 从图中可以看出基区掺杂浓度的降低使得 BNRD 器件的转折电压明显升高, 这主要是由于:P 区为 BNRD 器件高反压 PN 结的低掺杂区, 而 PN 结的击穿电压主要由低掺杂区的杂质浓度决定, 因此 BNRD 器件 P 区的杂质浓度的降低将使其转折电压升高.

#### 4.5 基区(P 区)扩散结深 $W_P$ 对 BNRD 特性的影响

两个 BNRD 器件只有  $W_P$  不同, 其中图 6(b) 中曲线 4 对应器件的  $W_P$  为  $4\mu\text{m}$ , 而曲线 3 对应器件的  $W_P$  为  $3\mu\text{m}$ . 由图看出曲线 3 的转折电压略高, 这并不是由于  $W_P$  的减小引起的. 因为采用本文所选方法描述器件时, 当 P 区表面杂质浓度保持不变而扩散结深减小, 引起杂质浓度梯度增加即浓度下降加快, 这样使得在反偏 PN 结处的 P 区杂质浓度降低, 击穿电压升高. 从图中还可以看到  $W_P$  的减小使器件的维持电流降低.

## 5 结束语

本文采用有限差分方法对双向 S 型负阻器件进行了计算机二维数值模拟, 得到了器件的  $I$ - $V$  曲线及相应状态下器件内部的电位、电子空穴浓度和电流密度分布. 从  $I$ - $V$  曲线可以得到器件的静态电性参数, 而从器件的电流密度分布可以更清晰地了解该器件的工作情况. 通过进一步工作, 总结得出器件结构参数对电特性参数的影响关系. 这对于 BNRD 器件的合理设计将有重要意义.

## 参 考 文 献

- [1] 李凤银,等,半导体学报,1984,5(6): 698~701.
- [2] 魏希文,等,电子学报,1995,23(2): 74~77.
- [3] 何野,魏同立,半导体器件的计算机模拟方法,北京:科学出版社,1989,第四章.

## Two-Dimensional Numerical Simulation of Bi-Directional 'S' Type Negative Resistance Device

Zhang Fubin, Li Jianjun and Wei Xiwen

(Department of Physics, Dalian University of Technology, Dalian 116023)

Received 1 April 1996, revised manuscript received 12 September 1996

**Abstract** A two-dimensional numerical method used to simulate the device named “Bi-directional ‘S’ Type Negative Resistance Device(BNRD)” is introduced. With the method, we have obtained the 2-D distribution for the voltage, electrons, holes and current density in the BNRD at both the block and conduct states. All these are very useful to understand the mechanism of the device operation. In addition, using the approach we have simulated several BNRD with different structure and process parameters, and summarized the influences of various structure and process parameters upon electronic characteristics of the devices.

EEACC: 2560Z,0290