

# 高纯 GaAs 的非线性伏安特性

陈忠辉 刘普霖 史国良 陆 卫 沈学础

(中国科学院红外物理国家实验室 上海技术物理研究所 上海 200083)

**摘要** 报道了 4.2K 下 N 型高纯 MBE GaAs 的非线性伏安 ( $I-V$ ) 特性. 在第一个 S 形负阻区的高场侧, 发现了另外三个 S 形负阻区. 建立了新的产生-复合模型, 给出了多个负阻现象的微观物理机制. 进一步的实验结果表明, 非线性  $I-V$  特性的滞后现象与外电场变化的历史有关.

**PACC:** 7220H, 7280E, 7155

## 1 引言

迄今关于 N 型 GaAs 中 S 形电流控制负阻 (SNDC) 性质的研究主要分两个方面: 一方面是对应击穿的 SNDC 微观物理起源的研究; 另一方面是关于击穿后的自催化混沌现象的研究<sup>[1,4]</sup>. 而 SNDC 的微观物理起源尚在争论之中<sup>[6-9]</sup>, 它们都定性或半定量地解释了单个 SNDC 现象, 都没有预言多个 SNDC 现象. 近几年, 关于击穿后非线性输运的研究主要集中在混沌现象的动态性质方面<sup>[3]</sup>, 而关于静态  $I-V$  特性实验结果的报道较少.

我们测量了 4.2K 下 N 型 GaAs 的静态  $I-V$  特性, 观察到四个 S 形负阻区. 但目前的理论尚不能解释该结果, 因此本文建立了新的产生复合模型, 该模型同时考虑了基态和多个高激发态对产生复合过程的影响, 定性解释了多个 SNDC 的出现.

GaAs 非线性输运中另一个重要现象是  $I-V$  特性的滞后效应<sup>[1]</sup>. 非平衡相变理论<sup>[2]</sup>认为  $I-V$  特性的滞后效应是由于半导体中高电导相与低电导相之间双稳相的存在引起的, 与外电场变化的历史无关. 本文第一次给出了  $I-V$  特性的滞后效应与外电场变化历史有关的实验结果, 该结果表明非平衡相变理论有局限性.

## 2 实验

实验中研究的样品是在半绝缘 GaAs 衬底上用 MBE 法生长的 GaAs 外延薄层, 其中故意掺入了杂质硅, 外延薄层厚度约为 2 微米, 表面为  $10 \times 5 \text{mm}^2$ . 300K 时,  $n = 1.7 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ,  $\mu = 6800 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ; 77K 时,  $n = 1.4 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ,  $\mu = 37000 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ . 样品的欧姆电极

陈忠辉 男, 1969 年生, 博士生, 目前从事半导体磁光光谱和红外光谱研究

刘普霖 男, 1937 年生, 副研究员, 目前从事半导体物理、红外物理、红外光谱和红外磁光光谱研究

1993 年 8 月 28 日收到初稿, 1993 年 10 月 18 日收到修改稿

在 450°C, N<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub> 混合气氛中合金化得到. 在本征光照射下, 样品的电极特性测量结果表明该电极在 4.2—300K 温度范围内均保持很好的欧姆电性.

### 3 实验结果与讨论

暗背景 4.2K 下样品的伏安特性如图 1 所示. 当电场上升时, 依次出现四个 S 形电流控制的负阻区; 当电场从高电场下降时, 出现滞后效应. 而且滞后电场与流过样品最大电流的关系如表 1 所示, 其中滞后电场值表示在临界击穿电场对应的电流下, 电流上升和下降时对应的电场值之差. 由表 1 可见滞后效应与外电场变化的历史有关(电流的最大值有关).

图 1 中的第一个(自下而上)SNDC 是由于电场达到临界电场  $F_{C1}$  后, 类氢施主浅杂质基态上的电子被导带中高于临界能量的那部分热电子碰撞离化, 导致击穿所致<sup>[11]</sup>. 而第二、三、四个 SNDC 与第一个 SNDC 有两个共同的特征: (1) 存在临界电场; (2) 达到临界电场后电流快速上升. 可见在第二、三、四个 SNDC 区发生了与第一个 SNDC 区类似的击穿, 临界电场值  $F_{C1}$ 、 $F_{C2}$ 、 $F_{C3}$  和  $F_{C4}$  依次增大, 而且每次击穿后电导变大, 也就是导带中导电电子浓度变大(因为在第一次击穿后的较小电场范围内, 电子迁移率几乎不变<sup>[12]</sup>). 基于上述实验结果, 本文认为类氢施主基态和多个高激发态对电子的产生复合过程均有影响, 它是 GaAs 中非线性输运现象的微观物理起源.

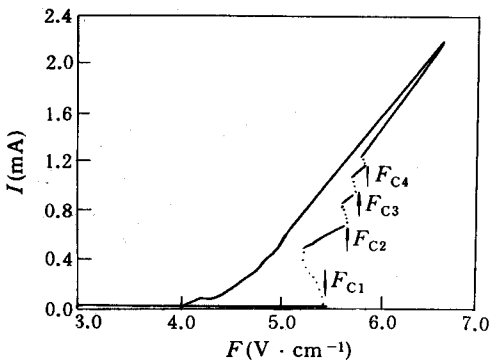


图 1 4.2K 下 GaAs 的伏安特性

$A_1$  迅速上升<sup>[10]</sup>, 产生率远大于复合率, 使导带中导电电子浓度迅速增大, 样品的电导迅速增大, 从而使样品两端的电场有所下降. 又由于导带中热电子能量分布近似为 Maxwell 函数分布<sup>[12]</sup>, 尽管电场的减小使超过临界能量  $E_2 - E_1$  的热电子的几率  $f_T$  变小, 碰撞离化系数  $A_1$  也有所下降但导带中电子浓度  $N$  比击穿前大, 故导带中超过临界能量  $E_2 - E_1$  的总数  $N \times f_T$  将继续增大, 从而引起电流的不断上升. 同时, 复合率也不断增大, 电子的产生率和复合率逐渐趋于动态平衡, 这样便出现第一个 SNDC. 电场继续增大, 电子的产生率和复合率

表 1 滞后电场与流过样品最大电流的关系

最大电流点	电流 (mA)	2.45	2.5	0.01
	电场 (V/cm)	7.25	7.37	5.00
滞后电场 ( $F_C - F_H$ ) (V/cm)		1.38	1.41	0.00

在 4.2K 下, GaAs 中类氢浅施主杂质激发态的热离化几率接近于 100%<sup>[13]</sup>, 因此可近似认为激发态到导带的离化率不随外电场而变化. 下面先定性描述新的产生复合模型, 并由该模型解释了多个 SNDC 现象. 4.2K 时 N 型 GaAs 中浅杂质电子的主要产生复合过程如图 2 所示, 在较小电场时, 导带中热电子主要来自浅杂质电子的热离化, 电子产生率和复合率基本平衡; 随电场的不断增大, 导带中热电子能量相应增大, 碰撞离化系数  $A_1$  也逐渐上升, 一旦电场增大到临界点  $F_{C1}$ , 导带中热电子能量达到类氢施主杂质基态与第一激发态能量差  $E_2 - E_1$ , 碰撞离化系数

基本保持平衡,电导率也基本不变,当电场上升到  $F_{C2}$  时,导带中热电子能量达到  $E_3 - E_1$  (其中  $E_3$  为第二激发态能量),碰撞离化系数  $A_2$  迅速上升,产生率远大于复合率,使导带中导电电子浓度迅速增大,从而使样品两端的电场有所下降.同理,由于热电子能量存在 Maxwell 分布,将出现第二个 SNDC. 随着电场的继续上升,在临界电场  $F_{C3}$ 、 $F_{C4}$  外依次出现第三、第四个 SNDC,它们分别对应临界能量  $E_4 - E_1$ 、 $E_5 - E_1$  (其中  $E_4$  为第三激发态能量,  $E_C$  为导带底的能量). 由于 GaAs 中类氢施主态的玻尔半径较大(约 100 埃),其更高激发态 ( $n \geq 5$ ) 已展宽到导带底<sup>[14]</sup>,故没有对应更高激发态的 SNDC.

同时,由临界电场估算基态到不同激发态碰撞离化的临界能量  $E_i$  与浅杂质的实际能级位置<sup>[5]</sup> 比较结果如图 3 所示,其中令  $E_i \propto F_{Ci}^2$ , 设第四个 SNDC 对应的  $E_i$  与  $E_5 - E_1$  的值相等,并由此来决定比例常数. 可见,第二、三、四个 SNDC 临界电场对应的  $E_i$  与实际的浅杂质能级位置基本一致,而第一个 SNDC 临界电场对应的  $E_i$  与浅杂质第一激发态的实际位置偏差较大,那是因为第一次击穿前后的电子迁移率变化较大<sup>[12]</sup> 所致,所以四个临界能量  $E_i$  近似地分别对应浅杂质基态到多个激发态的能量差. 上述结果表明,临界电场不仅与杂质基态有关,还与杂质激发态有关.

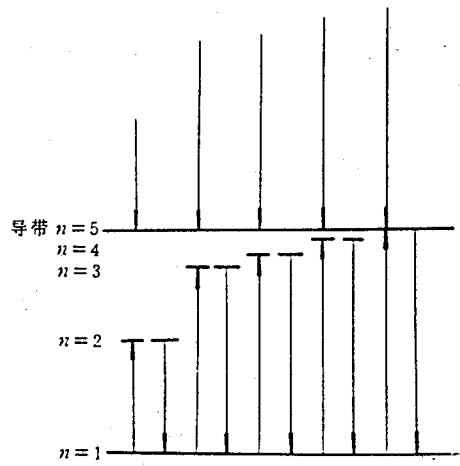


图 2 类氢浅杂质(包括基态和多个激发态)的产生复合过程示意图

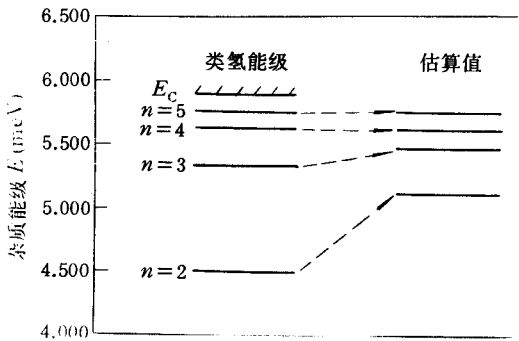


图 3 由临界场  $F_C$  估算的浅杂质能级与类氢浅杂质能级的比较

另外, E. Scholl 在关于 SNDC 的产生复合模型(不考虑高激发态对产生复合过程的影响)中,提出了非平衡相变理论<sup>[2]</sup>,该理论认为 SNDC 的临界电场  $F_C$  为由低电导相完全转变为高电导相的临界点,在高电导相与低电地相之间为双稳相过渡区,由于该双稳相过渡区的存在,从高电导相完全转变为低电导相的电场临界点  $F_H$  比发生 SNDC(即由低电导相完全转为高电导相)的临界电场  $F_C$  低,而且滞后电场 ( $F_C - F_H$ ) 与外电场变化的历史无关. 而由表 1 可知滞后电场 ( $F_C - F_H$ ) 与扫描过程中达到的最大电流有关,即与外电场变化的历史有关. 尤其是在第一次击穿后,若使电场值不再超过临界电场  $F_{C1}$ , 然后降低电流,该条件下无滞后效应出现.

而且,由低温下扫描电镜观察电流丝(Filament)的结果<sup>[15]</sup>可知,在刚发生击穿后,电流丝较小(只有几百微米),随着电流的上升,电流丝不断增大,一直扩展到整个样品. 由此,我们认为不同大小的电流丝将导致不同的滞后效应,即滞后效应可能与电流丝的形成、扩展、缩小的过程直接相关. 而且可以推断滞后效应的发生是有条件的,即只有当电流丝的大小超过某一临界尺寸后,才会有滞后效应发生.

上述滞后效应的结果表明,仅考虑类氢施主基态和第一激发态对电子产生复合过程有影响的非平衡相变理论不能解释上述实验事实.这也是本文刚建立的产生复合模型的一个佐证.

## 4 结论

本文研究了 4.2K 下 N 型高纯 GaAs 的非线性  $I$ - $V$  特性.在第一个 S 形电流控制负阻区的高场侧,发现了另外三个 S 形负阻区.并建立了新的产生-复合模型,该模型同时考虑了类氢施主杂质基态和多个激发态对产生复合过程的影响,多个负阻现象的微观物理起源是类氢施主基态到多个激发态的碰撞离化存在不同的临界电场.

另外,我们首次观察到 GaAs 非线性  $I$ - $V$  特性的滞后效应与外加电场的变化历史有关.通过分析表明,该滞后效应是由电流丝空间尺寸的变化引起的.

同时,本文展示了一种新的分析浅杂质电子态的手段,即仅由运输测量同时得到有关浅杂质基态和激发态的信息.进一步的工作正在进行.

## 参 考 文 献

- [1] R. A. Reynolds, Solid-State Electron., 1986, 11: 385.
- [2] E. Scholl, J. Phys. B-Condensed Matter, 1982, 46: 23.
- [3] J. Pozela and A. Namajunads, Appl. Phys. A, 1989, 48: 181.
- [4] K. Aoki, Magnetic Field-induced Anomaly and Chaotic Current Instability of Plane Current Filament in n-GaAs, Thessaloniki, the 20th Int. Conf. on the Phys. of Semicond., Greece, 1990, Singapore World Scientific Pub., 1990, 2578.
- [5] G. E. Stillman, D. M. Larsen, C. M. Wolfe and R. C. Brandt, Solid State Commun., 1971, 9: 2245.
- [6] A. L. Mcwhorter and R. H. Rediker, Proc. IRE, 1959, 47: 1207.
- [7] J. Jamashita, J. Phys. Soc. Japan, 1961, 16: 720.
- [8] T. Kurosawa, J. Phys. Soc. Japan, 1965, 20: 1405.
- [9] E. Scholl, Appl. Phys., 1989, 48: 95.
- [10] T. O. Poehler, Phys. Rev. B, 1971, 4(4): 1223.
- [11] A. A. Kastalskh, Phys. Stal. Sol. (a), 1973, 15: 599.
- [12] R. S. Crandall, Phys. Rev. B, 1970, 1(2): 730.
- [13] G. E. Stillman, Semiconductors and Semimetals, 1977, 12: 226.
- [14] P. K. Katana, S. O. Tiron and A. G. Cheban. Sov. Phys-Semicond., 1970, 4: 210.
- [15] K. Aoki, U. Rau, J. Peinke, J. Parisi and R. P. Huebener, J. Phys. Soc. Japan, 1990, 59(2): 420.

## Nonlinear Current-Voltage Characteristic of High Purity GaAs

Cheng Zhonghui, Liu Pulin, Shi Guoliang, Lu Wei and S. C. Shen

*(National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of  
Technical Physics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083)*

Received 28 August 1993, revised manuscript received 18 October 1993

**Abstract** Nonlinear current-voltage ( $I$ - $V$ ) characteristic of high purity n-GaAs grown by molecular beam epitaxial technology at 4.2K is reported. Beside the first s-shaped negative differential conductivity (SNDC), other three SNDC peaks are found in the higher field region. A new generation-recombination model, which gives the microcosmic physical mechanism of several SNDC peaks is presented. Further experimental results show that the hysteresis of nonlinear  $I$ - $V$  characteristic depends on the history of applying electric field to the sample.

**PACC:** 7220H, 7280E, 7155