

研究简报

利用静止畴原理制作的高灵敏度 新型 GaAs Hall 器件

郑 一 阳

(中国科学院半导体研究所, 北京)

1988年1月30日收到

本文用计算机模拟分析了 GaAs Hall 器件的工作原理, 当体内出现静止畴并扩展到 Hall 器件的电压端时, 器件输出阻抗增加, Hall 器件的灵敏度相应提高一个数量级; 获得高灵敏度的静止畴型的 GaAs Hall 器件; 在实验上证实了这一结果。这种新工作模式的器件将能得到更广泛的应用。

主题词: GaAs Hall 器件、高灵敏度、静止畴模式

一、引 言

磁敏 Hall 器件的一个重要参数是器件的灵敏度, 通常 GaAs Hall 器件的灵敏度虽比锗硅的 Hall 器件为高, 但最高只能做到 $30\text{mV}/\text{mA} \cdot \text{KG}$ 。

我们利用 GaAs 器件中转移电子效应的基本原理, 对畴的性能进行了研究, 通过计算机模拟分析, 发现当 Hall 器件中出现静止畴的情况, 并且当畴的耗尽层达到电压控制端时, 电压端的阻抗将大大增加, 这时器件的灵敏度可以比原来的高一个数量级, 出现了一种新的器件工作模式。由于这种工作模式是利用电子转移效应来获得器件输出端的高阻抗, 因此可以用浓度较高的材料来制备样品、克服因制作欧姆接触带来的不利因素。

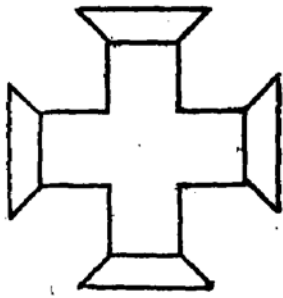
我们对这一新的器件工作原理进行了计算机模拟分析及实际样品制作与实验, 两者基本符合, 这一结果也为日本东京电化学实验室所观察到^[1], 但他们未作理论分析, 这种器件的工作模式将可以改进器件性能而获得更广泛的应用。

二、计算方法结果及讨论

对 Hall 器件的计算分析, 通常限于器件的低电场区, 即器件的欧姆区; 在分析高场区时, 砷化镓器件与硅锗不一样, 因为 GaAs Hall 器件在高场区类似于 Gunn 器件, 在阈值以后会出现电子转移效应而形成畴的模式, 这时必须考虑畴在 Hall 效应中的作用。

本文重点讨论超过阈值以后的高场区的器件性能, 所用图形如图 1 所示, 为通常所采用的十字形图形。为了简便而又不失真, 我们采用了一维的计算机模拟, 另外, 器件工作

状态的改变主要受电场的影响,因为器件在电场影响下出现转移电子效应,使器件阻抗增加很多,而由磁场引起的磁阻效应是二级效应,可以忽略;在计算中不考虑磁场对器件的影响。计算中采用通常的电流连续方程及泊松方程:



$$J(t) = en(x, t)v(E) - eD(E) \frac{\partial n(x, t)}{\partial x} + \epsilon \frac{\partial E(x, t)}{\partial t}$$

$$\frac{\partial E(x, t)}{\partial x} = \frac{e}{\epsilon} [n(x, t) - N_d(x)]. \quad (1)$$

图1 用于计算的器件模型 其中 x 是空间变量, t 是时间变量, e 是电子电荷, 为 1.602×10^{-19} 库仑, ϵ 是 GaAs 的介电常数, 为 1.1094×10^{-12} 法拉/厘米, $n(x, t)$ 是载流子浓度, $N_d(x)$ 是掺杂浓度, $E(x, t)$ 是电场, $D(E)$ 是扩散系数, 采用文献[2]和[3]给出的关系, 速度-电场关系 $v(E)$ 采用下式:

$$v(E) = \frac{2.25 \times 10^7}{T} E \cdot \frac{1 + \frac{0.265}{1 - 5.3 \times 10^{-6} T} (E/E_0)^2}{1 + (E/E_0)^2} \quad (2)$$

在计算中, 一般采用 $T = 300\text{K}$ 时的关系。

在解上述非线性方程时用到端电压条件:

$$V(t) = \int_0^l E(x, t) dx \quad (3)$$

另外, 由于 GaAs Hall 器件的电流端均为良好的欧姆接触, 在器件的电极处电场已降落到零, 故下式器件的边界条件成立:

$$E(0, t) = E(l, t) = 0 \quad (4)$$

在计算中另外一个处理是 Hall 器件的电压输出端几何形状的改变近似用一个浓度改变来代替, 实际上不管是浓度改变或几何形状改变其结果都将引起该处电场的改变。

计算中采用了不同浓度及有源区长度的器件。我们先计算了长样品中渡越畴的情况, 计算表明, 这时即使加于器件两端的电场已超过阈值, 但 Hall 器件的灵敏度不会提高, 因为这时高场畴从阴极产生, 其耗尽层经过 Hall 器件的电压端, 然后在阳极消失, 周而复始, 畴的耗尽层通过 Hall 器件电压端的时间很短, 因而从宏观上看, 没有引起 Hall 器件电压端的阻抗增加, 器件灵敏度也得不到提高, 因此, 在 Hall 器件中出现渡越畴的情况不能改善器件的性能。

要使 GaAs Hall 器件的电压端获得阻抗的改变, 我们自然会想到要利用静止畴的模式, 这时畴在器件中是固定不动的, 如果畴的耗尽层处于器件的电压输出端的位置, 则有可能提高器件电压端的阻抗而使器件的灵敏度增加。在静止畴模式中, 我们讨论阳极产生、阳极静止及深掺杂凹口所形成的静止畴两种模式。

首先讨论阳极产生、阳极静止的静止畴, 在计算中我们采用长度为 $9.0 \mu\text{m}$ 的短样品, 电极的过渡区各为 $1.0 \mu\text{m}$, Hall 电压端在 $4.0 \mu\text{m}$ 到 $5.0 \mu\text{m}$ 的位置, 外加偏压为 5.0 伏, 器件有源区浓度为 $1.0 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$, 当畴静止后, 可以得到图 2 中所示的电场及载流子浓

度分布,这时在 $4.0\mu\text{m}$ 到 $5.0\mu\text{m}$ 之间的区域在器件中仍处于低场区,相当于一个纯电阻,既没有因高场产生电子转移效应也不可能使电阻增加,但这时从 Hall 器件的电流端来看,阻抗已经增加,但整个器件阻抗增加在这时对 Hall 输出没有贡献,反而因为整个器件阻抗增加、电流减少而使 Hall 器件的输出减小。

转移电子效应是由N型 GaAs 材料的能带结构引起的, GaAs 体效应器件(目前主要指 Gunn 器件及 Hall 器件)中,在导带中存在一个下能谷和两个上能谷,下能谷与两个上能谷的能量差分别为 $\Delta E_1 = 0.31\text{eV}$, $\Delta E_2 = 0.36\text{eV}$, 其中 [111] 晶向的能量差较小,为 $\Delta E_1 = 0.31\text{eV}$ 。下能谷的电子有效质量较小,迁移率较高,分别为 $m_1^* = 0.067m_0$, 迁移率 $\mu_1 = 0.8\text{m}^2/\text{V}\cdot\text{S}$; 但上能谷的电子有效质量 $m_2^* = 0.55m_0$, 迁移率 $\mu_2 \approx 0.01\text{m}^2/\text{V}\cdot\text{S}$, 其中 m_0 为电子的静止质量,由于上能谷的有效态密度是下能谷的 94 倍,因此上能谷能够容纳所有下能谷转移上来的电子。

当N型 GaAs Hall 器件中的平均电场超过阈值(即 3 千伏/厘米)时,在器件内部即有高场畴产生,在畴内高电场作用下,下能谷的电子大量转移到上能谷,使得下能谷的电子浓度减小,而且由于这时在上能谷的迁移率减小,使器件的抗阻增加,这时 Hall 输出也相应地增加。

但是计算表明,在阳极产生阳极静止的这种畴模式中、当畴静止时,畴内的载流子浓度不但没有下降,反而上升,从图中 $n(x)$ 的分布曲线(图中以虚线表示)、可以看出,这部份增加的载流子来源于阳极边界,这时阳极边界载流子分布曲线 $n(x)$ 比掺杂浓度曲线 $N_0(x)$ 的分布曲线要向里推移一段,这正好说明畴的耗尽层进入了阳极边界。

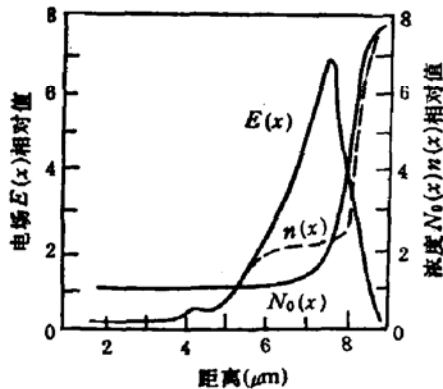


图2 阳极产生阳极静止的静止畴电场浓度分布

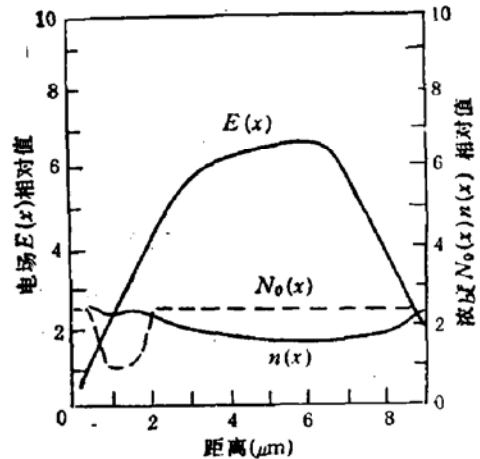


图3 深凹口所形成静止畴中电场及浓度分布

能使 GaAs Hall 器件获得高灵敏度的是我们以前讨论过的深凹口所形成的静止畴模式^[4-6],由于器件体内存在浓度的凹口,当畴产生时,畴的积累层填满凹口,而耗尽层分布在体内,使体内浓度下降,如图 3 所示,在 Hall 器件电压输出端的位置上,也形成低浓度区,从而使 Hall 器件的电压输出端阻抗明显增加,由于 Hall 输出与 Hall 电压端的阻抗有正比的关系,因此使 Hall 输出大大增加。计算结果可知,器件的长度短一些,有利于畴的耗尽层达到 Hall 电压端,从而获得高灵敏度的新型 Hall 器件。

三、实验结果

我们制作了如图 1 所示的十字形 Hall 器件,并用不同长度的样品进行了实验,结果表明,在所有长度超过 $100\mu\text{m}$ 的样品中,均未获得超高灵敏度的器件。因为这时即使电压加高到超过阈值,畴的耗尽层也不能展宽到 Hall 电压端,如果偏压再继续加高,器件已出现较明显的热效应,对测量带来很大的误差。

有意义的实验工作是在短样品中,例如在 $4-5\mu\text{m}$ 长的器件或长度更短的器件中,这时必须采用薄的外延层,或 $0.3\mu\text{m}$ 的离子注入 GaAs 片子,实验中研究了整个伏安特性曲线的三个部分,如图 4 所示,通常 Hall 器件是工作在图中所示的 I 区,即欧姆区;我们现在重点讨论的是 II 区,可以获得高的器件灵敏度;由于采用了短样品,因此电压可以加得很高,直到畴产生雪崩振荡^[7],即图中所示的 III 区,在 III 区中由于畴雪崩后产生了电子-空穴对,使体内浓度增加,因而 Hall 输出反而减小, Hall 器件工作在这一区域是不可取的。

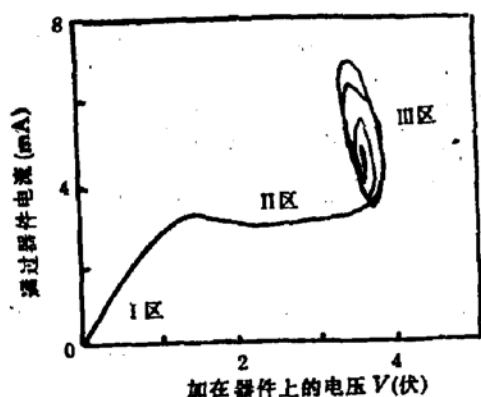


图 4 器件伏安特性曲线的三个区域,欧姆区 I,负阻区 II,雪崩区 III.

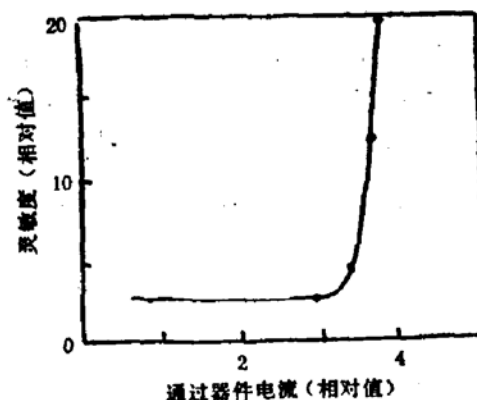


图 5 Hall 器件灵敏度随器件电流变化的曲线

当我们把器件的工作点偏置在从 I 区到 II 区时,在短样品中可以得到如图 5 所示的 Hall 器件灵敏度随电流变化的曲线,在电流较小时,说明器件处于欧姆区, Hall 器件的输出与电流成正比增加,而灵敏度是一个常数,但是当电流继续增加,器件内部有畴产生时,如图 4 中 II 区所示,这时器件的电流不再增加,电压增加使畴展宽,当畴的耗尽层展宽到霍尔电压输出端时,器件的输出阻抗突然增加,使器件的输出增加近一个量级,因而得到高灵敏度的霍尔器件。

四、结 论

GaAs Hall 器件通常只工作于伏安特性曲线的欧姆区,而当工作于负阻区时,会出现新的模式,特别是工作于静止畴的模式,由于体内阻抗的增加,能获得很高的灵敏度,条件是要在短样品中,并施加足够高的外电压;因而可以选用较高浓度的材料来制备器件,使欧姆接触比较容易完成,而器件的高灵敏度是靠器件形成耗尽层而获得的体内部阻抗来

达到的,这种新的器件模式可能带来一些好的特性,但要真正实用化还有待于进一步深入研究。

参 考 文 献

- [1] T. Kanayama *et al.*, The 4th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators. Tokyo Japan. June 2—5(1987), p. 532.
- [2] W. Fawcett and H. D. Rees, *Phys. Lett.*, **29A**, 578(1972).
- [3] K. R. Freeman and G. S. Hobson, *IEEE Trans.*, **ED-19**, 62(1972).
- [4] 郑一阳, *半导体学报*, **6**, 469(1985).
- [5] 郑一阳, *半导体学报*, **6**, 475(1985).
- [6] Zheng Yiyang (郑一阳), *Modelling, Simulation & Control*, A. AMSE Press, Vol. 12, No 3, 1987, p47—56.
- [7] Wang Shouwu (王守武), Zheng Yiyang (郑一阳), 等, *Modelling, Simulation & Control*, A (France), Vol. 9, no. 3, p1—11(1987).

A New High Sensitivity GaAs Hall Devices Fabricated by means of Stationary Domain Model

Zheng Yiyang

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica, Beijing)

Abstract

The operation principle of the stationary domain in GaAs Hall devices has been investigated by using computer simulation. The output impedance of the devices will increase and the sensitivity of Hall devices will be correspondingly enhanced by one order of magnitude when the stationary domain occurs in the bulk and extends to the voltage control terminal. A new Hall device operating at the stationary domain model has been fabricated and the new devices will be widely used.

KEY WORDS: GaAs, Hall Devices, High Sensitivity, Stationary Domain Model