

外延 GaAs 平面 Hall 器件

郑一阳 张进昌 刘衍芳

(中国科学院半导体研究所)

1984年7月14日收到

本文讨论了用 GaAs 液相和汽相材料制备的 Hall 器件。在内阻为 $1k\Omega$ 时得到的灵敏度为 $30mV/mA \cdot kG$, 温度系数为 $0.01\%/^{\circ}C$, 并可工作在 $-50 \sim +250^{\circ}C$ 的温区。还讨论了掺 Cr 高阻衬底、外延层质量及制作工艺对器件质量的影响。

一、引 言

Hall 器件是利用霍尔效应的磁电性能——即磁电转换来进行工作的, 因此, 原则上只要半导体器件电参数在磁场作用下有变化都可以制成电磁传感器, 但在实际应用中, 测量磁场中器件的 Hall 电压既方便又灵敏, 从而制成了 Hall 器件, 国际上对 GaAs Hall 器件已开展了很多研究工作^[1,2]。

本文讨论利用 GaAs 外延材料制作高质量的 GaAs Hall 器件, 说明 GaAs 掺 Cr 衬底及优质 GaAs 外延层的选择对制作器件的重要性; 指出材料的迁移率和界面状态是关键, 并提出了获得高质量 GaAs 平面 Hall 器件的途径。

二、器件主要指标及特点

众所周知, Hall 器件有两个主要关系式, 一是霍尔电势

$$V_H = K_H(I \times B) \sin \varphi, \quad (1)$$

其中 K_H 是 Hall 元件的灵敏度, 单位为 $mV/mA \cdot kG$, I 是通过器件的工作电流, B 是磁感应强度, φ 是器件平面与磁场的夹角, 当器件平面垂直于磁场时, $\varphi = 90^{\circ}$, $\sin \varphi = 1$ 。

另一个公式是器件的直流输入输出电阻

$$R_0 = \frac{1}{ne\mu} \cdot \frac{l}{d\omega}. \quad (2)$$

其中 n 为器件的载流子浓度, e 是电子电荷, 为 1.602×10^{-19} 库仑, μ 是 GaAs 外延层材料的迁移率, l 、 d 和 ω 分别是器件有源区的长、厚和宽。实际器件如图 1 所示。

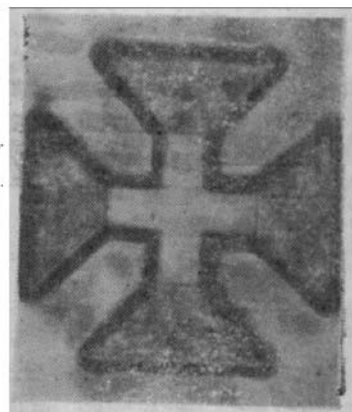


图1 平面 GaAs Hall 器件

用 GaAs 材料制作 Hall 器件的特点是因为它具有 $1.42eV$ 的宽的禁带宽度, 因此能

在 250°C 的高温下工作, 同时由于制作了高迁移率的外延材料, 因此可以得到高的 Hall 电势及小的 Hall 电势的温度系数, 而为 Ge、Si 制作的 Hall 器件所不及。

Hall 器件所用的 GaAs 外延片由北京有色金属研究总院提供, 器件工艺是典型的 GaAs 平面工艺, 包括蒸发、合金、光刻成型及封装等步骤, 最后进行老化实验及测试。

由于 Hall 灵敏度与器件内阻有关, 器件内阻越高输出的 Hall 电势也越高, 为了进行比较, 我们在每千欧姆内阻条件下进行比较, 并把这一单位定为单位内阻灵敏度, 用 $\text{mV}/\text{mA}\cdot\text{k}\Omega$ 表示。

1. 器件参数的温度特性

Hall 电势随温度的变化是一个极为重要的参数, 因为通常要求在温度变化时仍能稳定输出。图 2 说明 Hall 电势随温度的变化规律, 测得的结果是正温度系数, 从 -50°C 到 $+250^{\circ}\text{C}$ 的变化率为 $1\times 10^{-2}\%/^{\circ}\text{C}$ 。正温度系数在电路中使用比较方便, 可以免去温度补偿。在测量中由于器件内阻会随温度变化, 因此需要用一个恒流源使工作电流保持不变, 同时还要使磁场恒定不变。

由于内阻随温度而增加, 因此单位内阻的 Hall 电势随温度增加很快下降, 这说明迁移率是随温度增加而下降的。

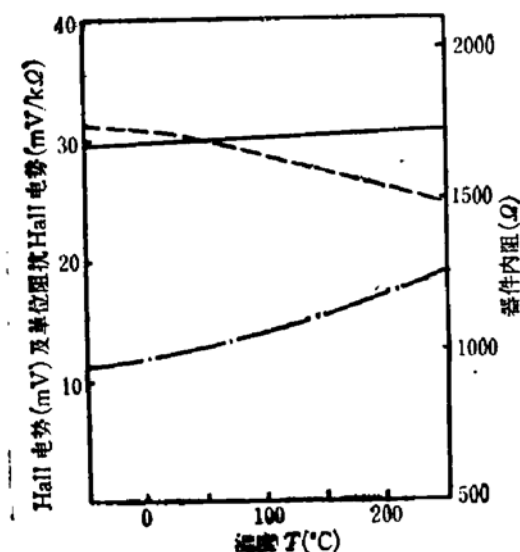


图 2 器件 Hall 输出, 单位阻抗 Hall 输出及内阻的温度变化

—— 器件内阻
—— Hall 电势 (1mA 电流, 1kG 磁场)
---- 单位阻抗 Hall 电势 (1mA 电流, 1kG 磁场)

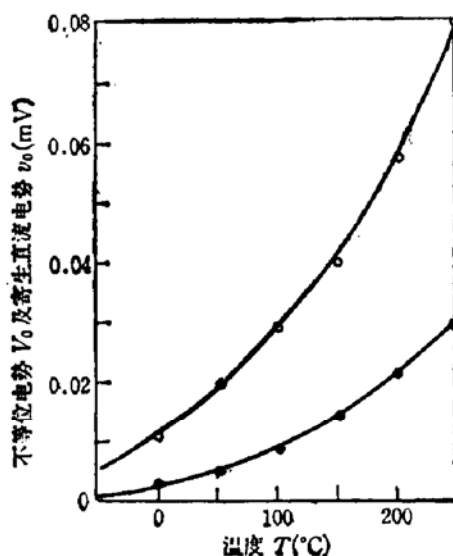


图 3 寄生直流电势及不等位电势的温度关系

—○— 不等位电势 ($I = 1\text{mA}$ 直流)
—●— 寄生直流电势 ($I = 1\text{mA}$ 交流)

器件的另外两个参数—不等位电势和寄生直流电势的温度关系如图 3 所示。Hall 器件的不等位电势的温度关系通常不是线性的, 但一般随温度而增加, 图中是 84-8[#] 的温度关系。由于不等位电势主要是在相邻两电极之间腐蚀不均匀而引起的, 在成型过程中难于做到完全对称, 当温度增加时, 它们的电导的贡献也各不相同, 使不平衡增加, 从而使不等位电势增加, 只有在一些样品中观察到在某一温区中有相反的现象。

寄生直流电势的温度关系也不是很确定的, 图中所示也是 84-8[#] 的变化规律。

2. 器件参数随电流的变化

Hall 电势 V_H 随电流的变化如图 4 所示, 这时磁场保持恒定不变。从公式(1)可以看出, 在一定的磁场及电流范围内, 霍尔输出与电流成线性关系, 其斜率为单位磁场下的灵

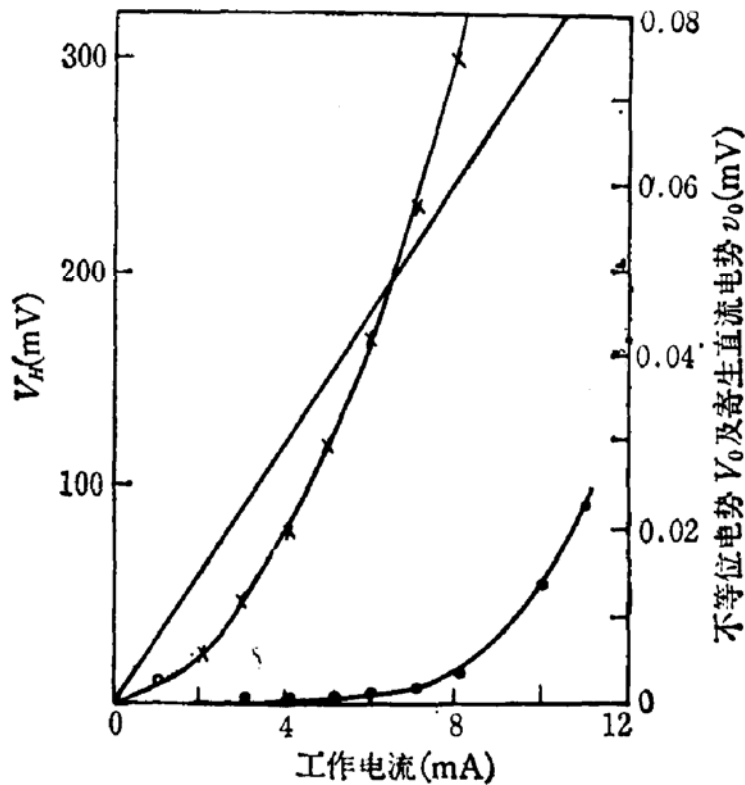


图 4 Hall 电势、不等位电势及寄生直流电势随电流的关系

- Hall 电势 V_H ($T = 25^\circ\text{C}$ $B = 1\text{kG}$)
- x—x— 不等位电势 V_0 ($T = 25^\circ\text{C}$ 不加磁场)
- 寄生直流电势 v_0 ($T = 25^\circ\text{C}$ 不加磁场)

敏度。超过电流电压关系的线性区, 电流开始出现饱和, 迁移率不再是一个常数。而且在实际的器件中, 这时电流较大、电压较高, 器件的输入功率会使器件有源区的温度上升, 影响到测量的准确性。

测量不等位电势 V_0 及寄生直流电势 v_0 随器件工作电流变化时, 是在不加磁场的情况下进行的。当电流增加时, 由于器件的不对称性而会使不等位电势 V_0 很快增加; 电流增加时也会使寄生直流电势 v_0 增加。

当器件做得比较对称, 不等位电势很微小时, 要注意对器件进行电磁屏蔽, 否则周围仪器设备的磁场或地磁场会对器件产生作用, 使测得的结果不是真实值, 而是一个弱磁场下的 Hall 电势。当然, 要获得一个很弱磁场是相当困难的, 但最好能屏蔽到 10^{-2} — 10^{-3} 高斯。另外, 器件不等位也受光的影响, 要注意对光的屏蔽。

3. 器件参数随磁场的变化

Hall 器件是一个磁电转换器件, 因此霍尔电势随磁场的变化也是一个关键的参数, 如

图5所示。在电流电压关系的线性区中, V_H 与流过器件的电流及外加磁场成线性关系, 而且直到 12 千高斯, 器件的线性度仍然很好。磁场超过 15 千高斯, 线性度变差。当磁场

增加时, 器件磁阻增加, 故要保持电流恒定。图中可知, 当器件工作电流为 5mA 时, V_H 的最大开路电压可达 1.5 伏。

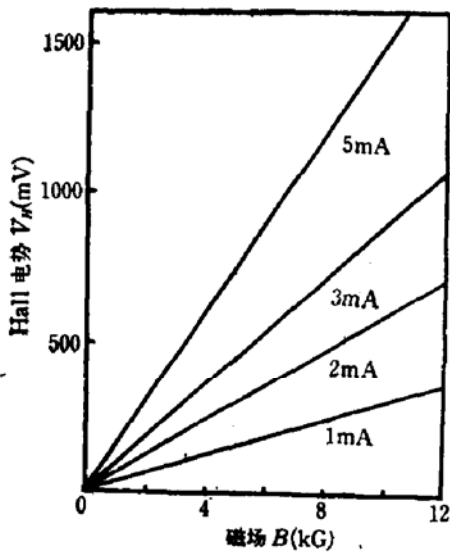


图5 不同工作电流的 Hall 电势随磁场的变化

三、如何获得高质量的GaAsHall器件

下面对怎样获得灵敏度高, Hall 电势温度系数小, 不等位电势低及寄生直流电势小的 GaAs Hall 器件进行讨论。

1. 高的 Hall 灵敏度 K_H

要获得高灵敏度的 Hall 器件必须制作高迁移率的 GaAs 材料, 不仅外延层材料、还有外延层与衬底之间的界面层质量, 后者受衬底的位错、缺陷等不完整性和杂质影响。因此不管怎样一种高迁移率的高纯 GaAs 外延层, 总会有一层迁移率不高的界面层, 这样, 精心处理界面及减薄界面层的厚度将是一个关键。特别要注意掺 Cr 衬底的表面处理及外延层的初始生长速度。当然, 外延层略厚一点, 过渡层窄一些将使器件有源区有相对高的平均迁移率。此外, 有源区中要尽量减少深能级中心, 提高材料的纯度, 使迁移率增加, 我们用 $10\mu\text{m}$ 左右厚度的汽相及液相外延片分别剥层腐蚀, 然后做成 Hall 器件并测量 Hall 输

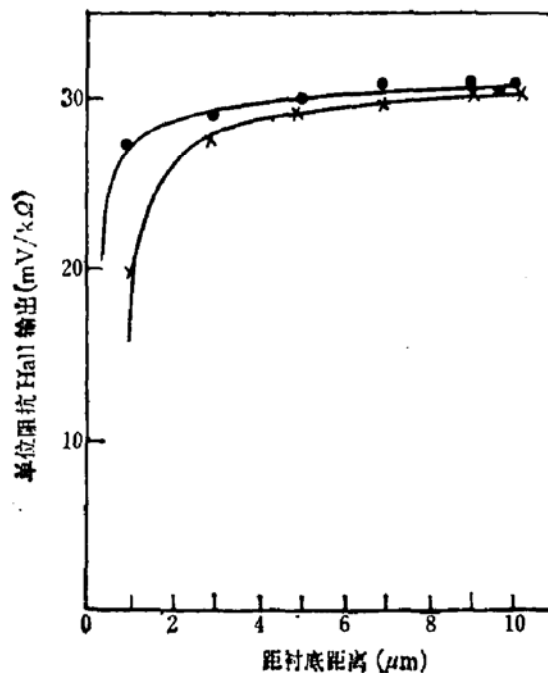


图6 单位阻抗 Hall 输出相对于减薄后的外延层厚度
 —●— 液相外延 —×— 汽相外延
 浓度 $n_0 = 1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$, 温度 $T = 25^\circ\text{C}$, 电流 $I = 1 \text{mA}$, 磁场 $B = 1 \text{kG}$

出 V_H , 观察它们的电流电压特性曲线。由于减薄材料后的 Hall 器件内阻增加, 相应的 V_H 绝对值增加, 要用单位内阻 Hall 输出来标志, 如图 6 所示, 所用材料的外延层的掺杂浓度是 $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$, 在未减薄时, 它们的 Hall 电势相差不多, 但在减薄到 $2.0 \mu\text{m}$ 以内时, 液相外延材料单位阻抗 Hall 输出电压随距衬底距离的下降要缓慢一些, 这与实测的两片材料的过渡层的情况相符, 所用的液相外延片的过渡层比汽相外延片的过渡层要陡一些。为了增加平均迁移率, 要使界面区尽量薄一些。

2. 低的 Hall 电势温度系数 α

GaAs 虽因宽的禁带而能耐高温, 但当材料外延层中存在深能级时, 在温度加高时会激发电子而参与导电, 导致 V_H 的减小, 成为负的温度系数。我们在制备 Hall 器件时, 有一部份为正温度系数, 且温度系数小于 $1 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$, 如前面图 2 所示。

我们对正温度系数做一初步分析后可把 Hall 输出写为

$$V_H = K_H(I \times B) \sin \varphi + V_0. \quad (3)$$

在实际的 Hall 器件中, 总要包含不等位电势 V_0 一项, 当温度增加时, 由于载流子浓度总是微弱的增加, 因此 $K_H(I \times B) \sin \varphi$ 一般是负的温度系数, 而从前面参数的温度关系一节中知道, V_0 是正温度系数, 总的 Hall 输出要看这两项的合成结果。当材料中深能级中心较多时(包括材料外延层及界面层上的深中心), Hall 输出是负的温度系数, 因为 V_0 的绝对值比较小, 随温度的变化的增量也较小, 只有当材料中深能级中心很少, 这时, 随着温度上升, 浓度几乎不变, 而 $K_H(I \times B) \sin \varphi$ 一项有很小的负温度系数, 经 V_0 补偿以后得到正的温度系数, 而且很小。

V_H 随温度变化的关系在图 2 中是一个典型曲线, 还有一些情况是温度系数开始是负的, 在 $160-180^\circ\text{C}$ 以后转变为正的, 这时要标明两段曲线的温度系数, 当然温度再上升, 达到本征激发时都出现负温度系数。另外就是逐层腐蚀 GaAs 有源层时, 留下部份做成 Hall 器件时 V_H 的温度系数变坏, 甚至达到 $5-7 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$, 这是由于界面层的比例增加。

GaAs 外延层中, 尤其是在它的界面上存在深能级中心这一事实已有很多报道, 特别是在研究 GaAs MESFET 时, 因为这时有源区很薄, 过渡层的影响增加, 通常如图 7 所示

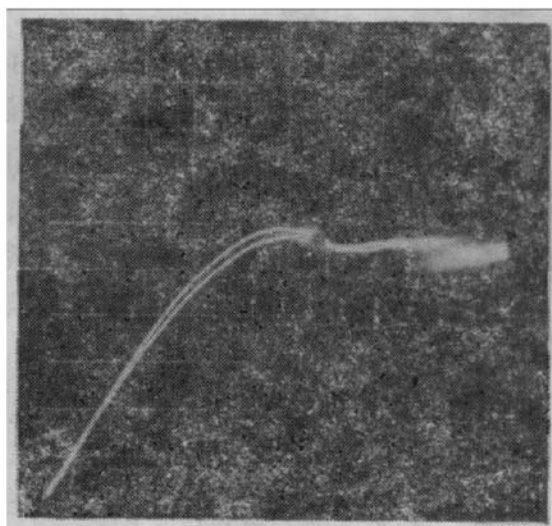


图 7 陷阱效应随电场的变化 x 轴 10 伏/格 y 轴 4mA/格

的迴线效应^[3,4],认为是由于陷阱效应引起的,在电场较低时,电流的上升下降曲线是重合的,但是当电场增加时,曲线不重合(电流大的那条线是上升曲线,小的是下降曲线),这种分离随电压增加而变得很明显,图中是用 50 周/秒的市电全波整流来测量的,在一个半波中不会引起热效应的差别。文献[2]中认为是外延系统微漏气形成的氧中心所致。

在制作器件时,还应选择电阻率高的掺 Cr GaAs 衬底,由于 GaAs Hall 器件要在 200—250℃ 的高温下工作,要选 250℃ 时的电阻率较高的衬底材料。

3. 小的不等位电势

引起器件不等位电势的原因很多,但主要是器件几何形状不对称而引起的,我们采用通常的十字形有源区而不是矩形,使 Hall 接点不会影响器件的输出讯号,并且它的尺寸可以和电流接点尺寸相同。由于器件的对称性,使电流接点与 Hall 接点均处于等值电流和等热状态。为减小不等位,要特别小心控制器件的本体腐蚀。由于 GaAs 材料在腐蚀时的各向异性性质,因此要多次腐蚀及选择合适的腐蚀液。不等位形成情况特别是对温度的关系比较复杂,这时包括有源区材料、界面层及衬底的温度变化关系,而相邻两电极之间的腐蚀程度又不一样,因此是一个综合的效果。不等位是器件成品率的一个关键。当然,器件有源区较薄对减小不等位是有利的。

4. 小的寄生直流电势

当器件工作电流为交变电流时,在不加外磁场的情况下, Hall 输出端会出现直流电势,电势的大小与不等位电势及器件欧姆接触有关。因此做好欧姆接触是很关键的,有关欧姆接触的文献已很多,此处不再重复,且从当前的水平来看,已能满足要求。这里提一下是合金过程中最好采用通氢闭管系统及快速升降温办法。从图 4 中看出,在 8mA 的电流之内,寄生直流电势较小,8mA 以上,寄生直流电势增加,反映了在较大工作电流时的欧姆接触。

四、结 论

我们用 GaAs 外延材料制备了平面 Hall 器件,它具有高的 Hall 灵敏度,低的 Hall 输出温度系数,小的不等位电势及小的寄生直流电势。为了比较器件的灵敏度、我们引入了单位内阻灵敏度,并指出提高材料迁移率及减小界面、体内陷阱的影响是提高器件质量的关键。

Hall 器件能在静止状态下感受磁场,而且简单、小型、频率响应宽、动态范围大、寿命长及在许多场合可以避免活动部件的磨损,因而在测量技术、自动化技术和信息处理等各方面有着广泛的应用前景。

GaAs Hall 器件已经推广到北京市器件十厂及河北省宣化七〇一厂生产。北京有色研究总院丁墨元及施益和同志提供了 GaAs 外延片。北京器件十厂李幼艾同志及河北宣化七〇一厂夏青和刘秀兰同志参加测试工作,在此致以深切的谢意。

参 考 文 献

- [1] N. Matsuda, N. Akigama and T. Konno: JEE No.149 (1979) p38.
- [2] A. Hojo, S. Tanaka, and I. Fukui: Proceedings of the 7th Conference on Solid State Devices. Tokyo 1975 Supplement to Japanese Journal of Applied Physics **15**, 261 (1976).
- [3] P. Rossel, H. Tranduc, J. Graffuil and C. Aziz: Revue de Physique Appliquee **12**, 10, 1679. (1977).
- [4] M. G. Adlerstein: Electronics Letters **12**, 297 (1976).

GaAs Hall Elements Fabricated by Epitaxial Growth

Zheng Yiyang, Zhang Jinchang and Liu Yanfang

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica)

Abstract

A planar-structure Hall element has been fabricated using liquid or vapor phase epitaxial growth of an n-type layer on semi-insulating GaAs substrates. This Hall element generates a high Hall sensitivity, 30 mV/makG for 1 k Ω resistance, with a small temperature coefficient less than 0.01 percent/ $^{\circ}$ C in a temperature range from -50 to 250° C.