

高线性度外延及注入 GaAs Hall 器件

郑一阳

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要: 讨论了外延及注入制作的薄层 GaAs Hall 器件如何获得高的磁线性度。GaAs Hall 器件的磁线性度在高磁场下会有偏离, 但可以通过外延及注入的过渡层对有源区进行补偿, 在合适的有源区和过渡区的浓度和厚度分布中, 可以得到在 2.5T 的强磁场下, $\pm 0.04\%$ 的高磁线性度。

关键词: Hall 器件; 有源区及过渡区分布; 2.5T 磁场下 $\pm 0.04\%$ 的高磁线性度

EEACC: 2560F

中图分类号: TN 382

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2002)05-0505-04

1 引言

Hall 效应的发现虽然已有 100 多年的历史, 但真正有实用价值的是用半导体材料制作的 Hall 器件。目前, Si 集成、InSb 和 GaAs Hall 器件都得到广泛的使用, GaAs Hall 器件主要用于线性测量, 1982 年, Siemens^[1] 公司用离子注入制作的 Hall 器件, 在 1.5T 时的线性度为 $\pm 0.25\%$ 。同年, 日本 Hara^[2] 等用注入制作的 GaAs Hall 器件, 在 2.3T 磁场下得到 $\pm 0.12\%$ 的磁线性度, 但都没有对提高线性度作分析, 此后一直没有新的报道。

在制作测磁仪器仪表如特斯拉计时, 磁线性度是一个极为重要的参数, 如何去获得高线性度是一个长期困扰的问题, 至今一直没有明确的解释。本文首次讨论了在制作 Hall 器件时有源区和过渡区的关系, 并利用过渡区对有源区的补偿作用, 制作了外延及注入的 GaAs Hall 器件, 均得到高的磁线性度, 在 0~2.5T 的磁场下为 $\pm 0.04\%$ 的线性度, 在国际上处于最好的水平。

2 实验与测试

2.1 器件制作

用 GaAs 制作 Hall 器件有多种方法, 如离子注

入、气相外延、液相外延、分子束外延等, 我们用离子注入及气相外延的方法制作于 Hall 器件的 GaAs 薄层, 两种方法均用纯度半绝缘 GaAs 衬底, 取 $\langle 100 \rangle$ 晶向。

在室温下注入 Si 离子, 为了得到一个平坦的有源区分布, 往往需要有两次或三次不同能量和剂量的离子注入。通过分析我们采用两次注入。

第一次注入: 能量 350keV, 剂量 $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 。

第二次注入: 能量 130keV, 剂量 $1.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 。

注入后在 920°C 退火 15s, 得到很理想的平坦分布, 如图 1 所示。

有源区的浓度分布用自动浓度分布测试仪测试, 厚度在 $0.35\mu\text{m}$ 之内, 有源区载流子浓度为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $0.35\mu\text{m}$ 以后, 进入浓度的过渡区, 载流子浓度开始下降, 一直到 $0.60\mu\text{m}$, 浓度下降到 $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$; 在 $0.4\mu\text{m}$ 以后, 浓度随深度指数下降, 过渡区的厚度有 $0.25\mu\text{m}$ 。由此可以看出, 在整个浓度分布中, 过渡区占据了相当大的比例, 后面我们将讨论正是由于这一过渡区, 补偿了器件的磁线性度。

用外延片制作的 Hall 器件采用气相外延生长的薄层有源区, 厚度为 $0.5\mu\text{m}$ 左右, 浓度为 $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 片子是在 850°C 下掺锡形成的 n-GaAs。由于生长温度较高, 衬底和有源区之间也有一个过渡层, 类似于离子注入的浓度分布, 测得的器件灵敏度为 $2.7\text{mV}/(\text{mA} \cdot \text{T})$ 。

郑一阳 男, 1936 年出生, 研究员, 研究兴趣为半导体效应器件、Gunn 器件、Hall 器件及等离子器件。

2001-08-01 收到, 2001-11-27 定稿

©2002 中国电子学会

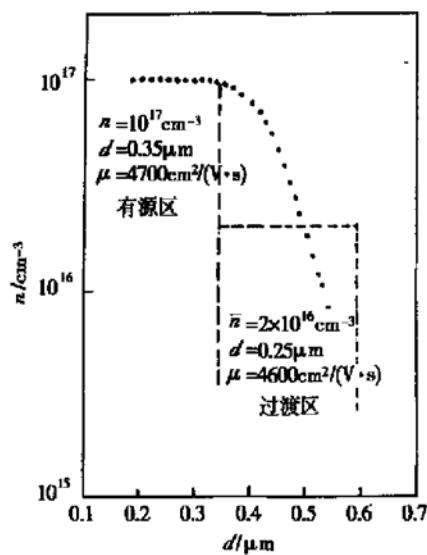


图 1 Si 离子注入的 n-GaAs 的浓度分布

Fig. 1 Depth profile of carrier concentration in Si-implanted n-GaAs layers

GaAs Hall 器件的一般性能我们已有报道^[3], 器件做成对称十字形结构, 有源区长度为 450 μm, 用带胶剥离技术制作电极, 蒸发 AuGeNi 合金并在 450°C 合金 3min 以形成欧姆接触, 然后腐蚀本体使 Hall 器件形成台面结构, 通常腐蚀的深度是有源区的 1.5 倍, 减小失调电压, 提高器件的成品率.

2.2 测试结果

磁线性度是用核磁共振仪(NMR)测试的. 在 100mm 直径的磁极中磁场均匀性好于 100ppm, 提供给 Hall 器件的恒流电流的稳定性好于 10ppm.

Hall 电势的显示用 1 μV 的 $5\frac{1}{2}$ 数字电压表, 测量是在恒温室中进行的. 但由于 Hall 器件是在恒流条件下测试的, 在强磁场中, Hall 器件由于磁阻效应会使内阻增加. 因此, 给 Hall 器件加较小的工作电流, 使它在测试过程中不会因功耗的变化引起温升, 从而影响到测试精度.

在外磁场下 Hall 器件的输出 V_H 有下列表达式:

$$V_H = \pm SIB \sin \phi \pm V_0$$

其中 S 是 Hall 器件的灵敏度, 单位为 mV/(mA · T); I 是通过 Hall 器件的工作电流, 单位为 mA; B 是外磁场, 单位为 T; ϕ 是 Hall 器件与外磁场的夹角, 测试时保持 90°. 当外磁场 $B=0$ 时, 即在不施加

外磁场时, $V_H = \pm V_0$, V_0 是失调电压, 与电流及温度有关. 在实际制作的器件中, 由于 $\pm V_0$ 不可能消除, 因此, 失调电压会影响到器件的磁线性度, 特别是在低磁场时, 为了消除 $\pm V_0$ 的影响, 可以把它看作一个寄生量, 它的值如果与 $V_{H0} = \pm SIB \sin \phi$ 同号, 则要从 V_{H0} 中减去, 相反, 则要在 V_{H0} 中加上 V_0 的值, 这样计算才能正确.

本文重点是讨论 GaAs Hall 器件的磁线性度 α , 它由下式定义:

$$\alpha = \frac{V_{H1} - V_{H10}}{V_{H10}} \times 100\%$$

其中 V_{H1} 是某一磁场中所测得的 Hall 电压值; V_{H10} 是线性直线值(即通常所说的理论值); $V_{H1} - V_{H10}$ 即 Hall 电压对理论值的偏离.

外延及注入 Hall 器件的 V_H 随磁场变化如图 2 所示, 直到 2.5T, 变化仍然是线性的, 这时已达到室温下的电磁铁的极限值.

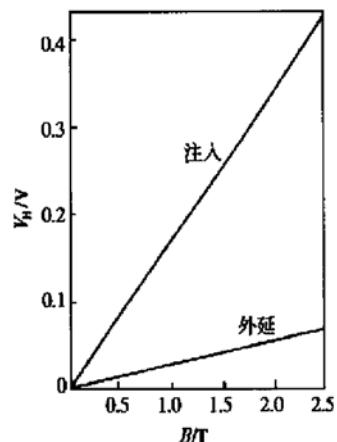


图 2 GaAs Hall 器件输出与磁场的关系

Fig. 2 Hall voltage of GaAs Hall devices as a function of magnetic-flux density

线性度偏差的详细情况如图 3 所示, 图中标明两只离子注入器件及一只外延 Hall 器件, 两只离子注入的器件的磁场线性度偏离趋势大体相同, 外延的则与注入的有些区别.

从大量的不同浓度分布的离子注入器件线性分布测量中可以得到这样的结论: 不同浓度分布的离子注入片的磁线性度是不一样的, 但在同一片的样品中, 线性度有较好的一致性. 由于所有器件的 V_0 是不相同的, 因此在计算中要将 V_0 按前述的方法扣除, 当然希望 V_0 的绝对值越小越好.

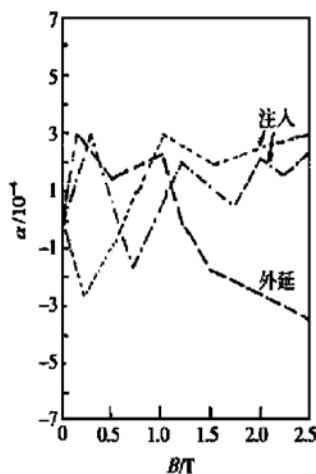


图 3 GaAs Hall 器件线性偏差与磁场的关系

Fig. 3 Linearity error of GaAs Hall devices as a function of magnetic-flux density

3 结果与讨论

从图 1 浓度分布曲线中我们看出, Hall 器件的有源区实际上由两部分组成. 在厚度小于 $0.35\mu\text{m}$ 的区域, 大体上看作一个浓度不变的区域, $n = 1 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ (实际上接近表面时浓度会有起伏), 是决定 Hall 器件性能的主要区域; 另一个区域是从 $0.35\mu\text{m}$ 到 $0.6\mu\text{m}$ 的区域, 这是一个过渡区域, 在这一区域中, 浓度从 $1 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 下降到 $3 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$, 可以看成是由多个很薄的不同浓度的 Hall 器件所组成, 这些不同浓度的 Hall 器件内阻在磁场中由于磁阻效应而有不同的变化. 图 4 是相同尺寸不同浓度的厚外延层样品在磁场中磁阻的变化, 浓度高的器件, 如 $1 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$, 它的磁阻变化率要小一些, 而浓度低的样品, 如 $1 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$, 磁阻变化率要大一些, 特别是在 1.5T 以后, 随磁场的增加变化更大一些, 实际上这是表明不同大小的迁移率随磁场的变化.

基于上面的分析, 为了把问题简化, 我们把图 1 的载流子浓度分布简化为两部分, 如图中虚线所示. 从表面到 $0.35\mu\text{m}$ 是一个 Hall 器件, 浓度是 $1 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$; 另一个是从 $0.35\mu\text{m}$ 到 $0.6\mu\text{m}$, 厚度为 $0.25\mu\text{m}$, 平均浓度取 $2 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$, 这两部分的迁移率分别取 $4700\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 和 $4600\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$. 根据上述给出的数据, 可以进行计算

$$R = \frac{1}{ne\mu} \times \frac{l}{wd}$$

其中 R 为器件内阻; $e = 1.6 \times 10^{-19}\text{C}$; $l = 450\mu\text{m}$; $w = 150\mu\text{m}$. 计算两部分电阻:

$$R_1 = \frac{1}{n_1 e \mu_1} \times \frac{l}{d_1 w} = 1.1398\text{k}\Omega$$

$$R_2 = \frac{1}{n_2 e \mu_2} \times \frac{l}{d_2 w} = 8.152\text{k}\Omega$$

两部分的并联电阻是

$$R = \frac{1}{1/R_1 + 1/R_2} = 1.000\text{k}\Omega$$

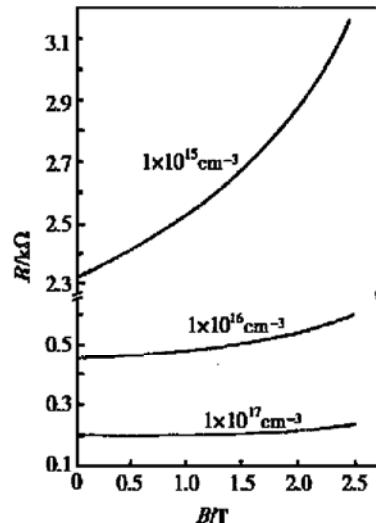


图 4 不同浓度器件的磁阻效应

Fig. 4 Magnetoresistance of GaAs Hall devices with different concentrate

实验中测得是 $1.006\text{k}\Omega$, 两者符合得很好, 这时外加恒流是 1.000mA , 外加电压为 1.000V , 可以算出流过 R_1 区的电流为 0.8773mA , 流过 R_2 区的电流为 0.1227mA ; 当磁场增加到 2.5T 时, 从图 4 的数据中可以算出 R_1 及 R_2 在 2.5T 时由于磁阻效应电阻分别变为: $R_1 = 1.27065\text{k}\Omega$, $R_2 = 9.6838\text{k}\Omega$, Hall 器件的总电阻 $R_{\text{磁}} = 1.1222\text{k}\Omega$. 由于 Hall 器件是恒流供电, 这时的工作电流仍然是 1.000mA , 但是由于有源区和过渡区的磁阻变化率不同, 这时电流产生重新分配, 有源区是 0.8832mA , 过渡区是 0.1158mA , 有源区的电流增加率是 6.725×10^{-3} , 按照 Hall 器件公式 $V_H = SIB \sin\phi \pm V_0$, V_H 也增加 6.725×10^{-3} 倍, 即在高磁场下 $V_{2.5\text{T}} = V_{1.0\text{T}} (1 + 6.725 \times 10^{-3})$, 这样, 原来在高场下趋于饱和或略有下降的量将得到补偿.

Hall 器件的 Hall 输出主要由浓度为 $1 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 的有源区确定, 过渡区的部分由于有较高的内

阻,而且与有源区是并联的关系,因此作用不是太大.为了证明补偿的效果,我们先测一只浓度为 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$,内阻为 300Ω 的Hall器件,线性度为 $\pm 0.15\%$,然后并上一只浓度为 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$,内阻为 $1\text{k}\Omega$ 的Hall器件,测得线性度为 $\pm 0.09\%$,补偿有一定的作用.但是要补偿得很好并不是一件容易的事,这也是多年来一直没有得到理想的高线性度的原因.早期的外延GaAs Hall器件有源区通常有 $3 \sim 10\mu\text{m}$ 厚,有源区起主导作用,过渡区的作用显示不出来.自从离子注入薄层Hall器件出现后,线性度才有较大的突破,因为这时有源区和过渡区的相互补偿才比较明显.我们通过大量样品的测试,得到以下结论:

(1) Hall输出 V_H 在超过 1.5T 的强磁场后,由于苏耳效应,会趋于饱和,使线性偏差出现负值,为了得到好的线性度,要进行补偿.

(2) 为了得到好的补偿效果,有源区的厚度和过渡区的厚度要有一个合适的比例,由于过渡区较薄,因此薄层有源区易于补偿.

(3) 可以通过计算机模拟计算,并采用分子束外延生长技术,得到更好的线性度.

4 结论

用离子注入和气相外延生长的薄层GaAs Hall器件,当有源层和过渡层的厚度比例合适时,过渡层对有源层进行补偿,此时可以得到好的线性度.实验得到了在 2.5T 的磁场下 $\pm 0.04\%$ 的线性度,文中还说明通过有源区和过渡区的浓度及厚度选择,可以得到线性度更好的Hall器件.

致谢 作者感谢Hall器件组的全体同志及离子注入组的全体同志制备了Hall器件,特别感谢上海计量所黄汝芹同志对样品的测试.

参考文献

- [1] Petlenpaul E, et al. Siemens Forschungs-und Entwicklungsberichte Research and Development Reports Bd. 11(1982) Nr. 1, 22
- [2] Hara T, et al. IEEE Trans Electron Devices, 1982, ED-29(1): 78
- [3] Zheng Yiyang, et al. Chinese Journal of Semiconductors, 1985, 6(4): 413[郑一阳, 等. 半导体学报, 1985, 6(4): 413]

High Linearity GaAs Hall Devices Fabricated by Epitaxial Growth and Ion Implantation

Zheng Yiyang

(Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: How to fabricate high linearity Hall devices in a thin active layer via epitaxial growth and ion implantation technology are studied and a good result is presented. Although the variation of Hall voltage with calibrated magnetic flux density shows the increasing linearity error in high magnetic field, if the proper carrier concentration distribution and its thickness in the active region and transition region can be controlled via implantation and epitaxial growth, to compete the current in the active region, the linearity will be $\pm 0.04\%$ in high magnetic field of 2.5T .

Key words: Hall devices; active region and transition region distribution; the linearity of $\pm 0.04\%$ in a high magnetic field of 2.5T

EEACC: 2560F

Article ID: 0253-4177(2002)05-0505-04

Zheng Yiyang male, was born in 1936, professor. He is engaged in the research on semiconductor bulk effect devices, Gunn devices, Hall devices and plasma devices.

Received 1 August 2001, revised manuscript received 27 November 2001

© 2002 The Chinese Institute of Electronics