

研究简报

霍尔器件的一种新的工作模式*

易明铄

(北京市电子工程有限公司, IC实验室 北京, 100005)

1991年4月16日收到, 1992年1月10日修改定稿

本文提出了霍尔器件的一种新的工作模式, 称为单端短路霍尔电流输出模式。理论分析表明, 在这种模式下霍尔器件的磁灵敏度将提高一倍。用镓砷与铟锑霍尔器件进行了实验。实验结果与理论满意的一致。

EEACC: 2490, 2790

一、引言

近年来集成半导体磁敏器件的研究受到学术界与工程界的很大重视^[1-3]。这一方面是由于电力电子技术等新兴领域的应用需要, 另一方面, 在各种传感器中磁敏器件又最适合于现有的集成工艺。目前, 除了传统的霍尔器件之外, 各种变型的霍尔器件^[4,5]与双极型磁敏晶体管^[6,7]和分离漏极 CMOS 场效应晶体管^[8-9]等的研究也都十分活跃。但从实用性能来看, 至今还没有一种器件能与霍尔器件竞争^[2]。

然而, 霍尔器件的研究和应用历来都是基于霍尔电压效应, 即霍尔器件对磁场的响应以差动霍尔电压的形式输出。本文提出霍尔器件的一种新的工作模式, 我们称之为单端短路霍尔电流输出模式。文中对新模式进行了理论分析, 解释了物理过程的图象, 并用镓砷与铟锑霍尔器件对理论结果进行了实验验证。

二、理论模型

在通常的近似条件下, 二维霍尔器件的电流密度方程为^[1]

$$J_{nx} = \sigma_{ab}(E_x - \mu_n^* B E_y), \quad (1)$$

$$J_{ny} = \sigma_{ab}(E_y + \mu_n^* B E_x), \quad (2)$$

其中 E_x, E_y 为电场强度分量, B 为磁感应强度, μ_n^* 为电子霍尔迁移率,

$$\sigma_{ab} = \sigma_n / [1 + (\mu_n^* B)^2]$$

* 本课题得到北京市自然科学基金资助。

为存在磁场时的电导率。

对于经典的霍尔器件工作模式,它的两个输出电极开路, 横向电流 $J_{xy} = 0$, 故由式(2)可给出电压驱动情况下归一化的霍尔电压灵敏度为

$$S_{vv} = (V_h/V_d)/B = G(E_y/E_x)/B = G\mu_n^*, \quad (3)$$

其中 V_h 为霍尔电压, V_d 为霍尔器件两个输入电极之间的驱动电压, G 为霍尔器件的几何因子。

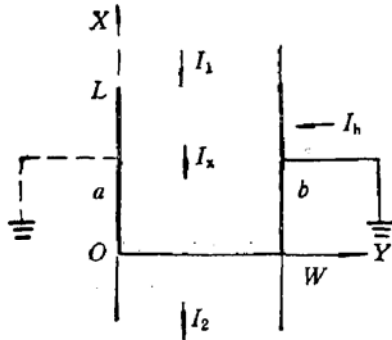


图1 霍尔器件的单端短路电流输出模式

本文提出的霍尔器件的新工作模式与经典模式有着显著的差别。在新模式下,霍尔器件的两个输出电极被强迫处于等电位状态。因此,霍尔器件对磁场的响应为短路霍尔电流。但是,两个输出电极又并非短路,其中只有一个输出电极允许电流通过,而另一个输出电极则不具备电流通路。因此,霍尔电流以单端输出形式从一个输出电极输出。这就是本文所说的单端短路电流输出模式,如图1所示。图中输出电极 a 用虚线接地,表示电极 a 的电位等于地电位,但是对电流来说它处于开路状态。输出电极 b 与地连结,因而其电位与输出电极 a 相等,并且可以输出霍尔电流。

且可以输出霍尔电流。

图1所示情形的严格分析需要用数值方法求解电位分布 $\phi(x, y)$ 的泊松方程。但是,为了获得新运行模式下霍尔器件灵敏度关系的简明表达式,下面将进行近似的解析分析。我们忽略输出电极的短路效应,并且仅考虑霍尔器件宽度 W 与输出电极长度 L 所限定的本征区域。 x 与 y 坐标如图1中所示。这样,问题的边界条件可表述如下:

$$y = 0, J_{ny}(x, 0) = 0, \quad (4)$$

$$y = W, \phi(x, W) = \phi(x, 0); \quad (5)$$

$$x = 0, \int_0^W J_{nx}(0, y) dy = I_2, \quad (6)$$

$$x = L, \int_0^W J_{nx}(L, y) dy = I_1. \quad (7)$$

设电位分布 $\phi(x, y)$ 的变量可分离,即 $\phi(x, y) = V(x)U(y)$, 利用式(4)和(5)的边界条件,可求得电场分量 E_x 与 E_y 的边界值有如下关系:

$$E_y(x, W) = -E_y(x, 0) = \mu_n^* B E_x(x, 0), \quad (8)$$

$$E_x(x, 0) = E_x(x, W). \quad (9)$$

从而可得,在边界 $y = W$ 处,霍尔电流密度 J_{ny} 的表达式为

$$J_{ny}(x, W) = 2\sigma_{nb}\mu_n^* B E_x(x, W). \quad (10)$$

上式对 x 积分,得到单端输出霍尔电流 I_h 为

$$I_h = 2\sigma_{nb}\mu_n^* B \Delta V(W), \quad (11)$$

其中

$$\Delta V(W) = \int_0^L E_x(x, W) dx, \quad (12)$$

为沿输出电极 b 边界两端的电压降。此压降取决于流经霍尔器件工作区间 $[0, L]$ 的偏

置电流。可以算出

$$\Delta V(W) = GI_0/\sigma_{ab}, \quad (13)$$

其中, I_0 为 $[0, L]$ 区间内的平均偏置电流, 可近似表示为

$$I_0 = (I_1 + I_2)/2. \quad (14)$$

而 $G \approx L/W$ 为理想情况下霍尔器件的几何因子。但是, 电极短路效应引入的修正因子也可一并纳入几何因子 G 中。将式(13)代入式(11), 可得

$$I_h = 2G\mu_n^*BI_0. \quad (15)$$

由上式可得单端短路霍尔电流的归一化磁灵敏度为

$$S_{ii} = (I_h/I_0)/B = 2G\mu_n^*. \quad (16)$$

对比式(16)与式(3)可见, 单端短路霍尔电流灵敏度比霍尔电压灵敏度提高了一倍, 如果两者几何因子相同的话。

上述结果可解释如下: 由于 $J_{xy}(x, 0) = 0$, 在边界 $y = 0$ 附近将出现霍尔电场 $E_y(x, 0)$, 以产生抵消霍尔电流的漂移电流, 这与经典的霍尔器件模式相同。但是, 由于存在式(5)所示的等电位边界条件, 根据式(8), 在 $y = W$ 处将出现与 $E_y(x, 0)$ 成镜像的电场 $E_y(x, W) = -E_y(x, 0)$ 。此镜像电场在边界 $y = W$ 附近产生的漂移电流正好与该处的霍尔电流相加, 从而使输出电流增大一倍。

三、实验结果

实验电路如图 2 所示。其中运放 OP_1 使被测霍尔器件的输出电极 a 处于虚地状态, 运放 OP_2 使输出电极 b 与电极 a 等电位, 并将输出电极 b 输出的信号电流 I_h 转换为电路的输出电压 V_0 。

实验测量了两种已工业化生产的霍尔器件。一种是外延 GaAs 器件, 另一种为 InSb 薄膜器件。对全部被测器件均进行了 S_{vv} 与 S_{ii} 的测量。实验表明, 同一器件的 S_{ii} 与 S_{vv} 的实验值符合 2 倍关系。图 3 给出了灵敏度有所散布的一批 GaAs 霍尔器件的 S_{ii} 与 S_{vv} 关系的测量结果。图中直线斜率近似为 1.9, 这与理论值十分接近。

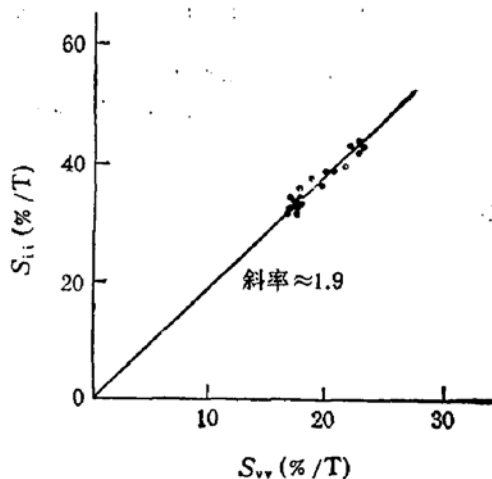
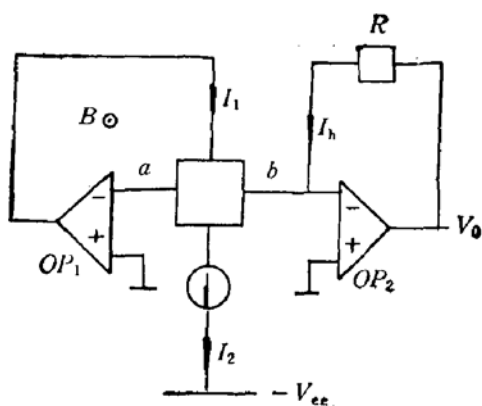


图 2 单端短路霍尔电流 I_h 的测量电路 $I_h = V_0/R$

图 3 GaAs 霍尔器件的 S_{ii} 与 S_{vv} 关系的实验结果

图 4 为灵敏度不同的两支 InSb 霍尔器件的归一化霍尔电压与归一化单端短路霍尔

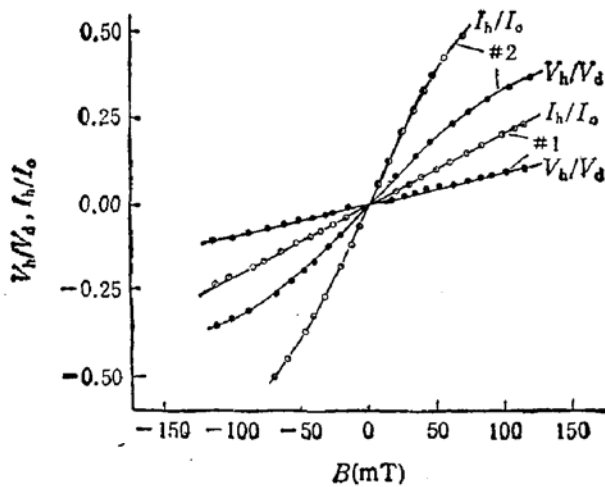


图 4 InSb 霍尔器件的霍尔电压与单端短路霍尔电流与磁感应强度的关系

样品 #1: $S_{vv} \approx 1.0/T$, $S_{ii} \approx 2.1/T$;

样品 #2: $S_{vv} \approx 4.2/T$, $S_{ii} \approx 8.4/T$.

电流随磁感应强度 B 变化的实验结果。

图中两支实验样品的 S_{ii} 与 S_{vv} 的比例关系也与理论预期一致。其中样品 #2 表现出明显的非线性。这是由于样品 #2 的 μ_n^* 值较高, 在实验的磁场强度范围内, 乘积 $\mu_n^* B$ 已接近和大于 0.1, 磁场对霍尔散射因子的影响已不可忽略[10]。但是灵敏度 S_{ii} 与 S_{vv} 仍基本保持二倍的比例关系。

四、结 论

本文提出了霍尔器件的一种新的工作模式-单端短路霍尔电流输出模式, 并

建立了近似的解析模型。理论分析表明, 新模式的一个突出优点是其磁灵敏度高, 比经典模式整提高一倍。用 GaAs 与 InSb 霍尔器件进行了实验, 实验结果与理论预期满意的一致。但是新模式下霍尔器件的设计准则将会与经典模式有所不同。“十”字形结构未必最优, 具体的结果有待于数值模拟。

致谢: 王月明同志与作者曾就有关的物理问题进行过十分有益的讨论, 谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] H. P. Baltes and R. S. Popovic, *Proc. IEEE*, **74** 1107, (1986).
- [2] R. S. Popovic, *Sensors and Actuators*, **17** 39, (1989).
- [3] S. Kordic, *Sensors and Actuators*, **10** 347, (1986).
- [4] A. M. J. Huizer and H. P. Baltes, *IEEE Trans. Electron Device Lett.*, **EDL-5** 482, (1984).
- [5] T. Nakamura and K. Maenaka, *Sensors and Actuators*, **A21-A23** 762, (1990).
- [6] L. Ristic, T. Smy and H. P. Baltes, *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED-36** 1076, (1989).
- [7] CH. S. Roumenin, *Sensors and Actuators*, **83**, **A24**(1990).
- [8] D. Misra, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, **SC-25**, 623(1990).
- [9] J. J. Clark, *Sensors and Actuators*, **A24** 107(1990).
- [10] R. S. Popovic and B. Halg, *Solid-State Electronics*, **31**, 1681(1988).

New Mode of Operation of Hall Devices

Yi Mingguang

(Beijing Electronic Engineering Company, IC Laboratory, Beijing, 100005)

Abstract

This paper describes a new mode of operation of the conventional Hall device, which is called the single-ended output mode of the short-circuit Hall current. Theoretical analysis shows that the magnetic sensitivity of the Hall device operating in the proposed mode is two times higher than that in the conventional mode.

Experimental results using GaAs and InSb Hall devices show agreement with the theoretical ones.

EEACC: 2490, 2790