

Analysis of the Key Technology and Developing Trend of the Hall Chip

Wenhao Xu¹, Xunhua Guo¹, Guoxing Wang¹, Jinling Chen²

¹The Micro Nano Electronics Department of Shanghai Jiao Tong University, Shanghai

²Wasion Group Limited, Changsha

Email: lxu991061325@sjtu.edu.cn, guoxh@sjtu.edu.cn, guoxing@sjtu.edu.cn, chenjinling@wasion.com

Received: Nov. 25th, 2014; revised: Dec. 16th, 2014; accepted: Dec. 21st, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The classification, application and market prospect of the Hall chip are introduced in this paper. The design difficulties are analyzed. The paper presents how to solve the temperature drift and offset voltage of the Hall chips in two aspects of Hall plates and signal processing circuits. Meanwhile, different solutions are also compared. Based on the design difficulties and the application, the developing trends such as high degree of integration, low temperature drift, high sensitivity, low offset voltage, new Hall plate structure and miniaturization are summarized.

Keywords

Hall Effect, Temperature Drift, Offset Voltage, Developing Trend

霍尔芯片关键技术及发展趋势分析

徐文毫¹, 郭训华¹, 王国兴¹, 陈金玲²

¹上海交通大学微纳电子学系, 上海

²威胜集团有限公司, 长沙

Email: lxu991061325@sjtu.edu.cn, guoxh@sjtu.edu.cn, guoxing@sjtu.edu.cn, chenjinling@wasion.com

收稿日期: 2014年11月25日; 修回日期: 2014年12月16日; 录用日期: 2014年12月21日

摘要

本文首先概述了霍尔芯片的分类、应用和市场前景。然后，分析了霍尔芯片的设计难点，并从霍尔盘和信号处理电路两个方面阐述了解决霍尔芯片温度漂移和失调电压的方案，同时也对不同解决方案的进行了对比。基于霍尔芯片的设计难点和应用，总结出霍尔芯片呈现高集成度、低温度性漂移、高灵敏度、低失调电压、新型的霍尔元件结构、微型化等发展趋势。

关键词

霍尔效应，温度漂移，失调电压，发展趋势

1. 概述

21 世纪人类全面进入信息电子化时代，更依赖于外界信息采集技术，作为现代信息技术三大支柱技术之一的传感器技术，是人类探知自然界信息的触角。霍尔芯片是根据霍尔效应制作的一种磁场传感器，可以将磁场信息转换成电信号。按照霍尔芯片的功能可以将它们分为：霍尔线性芯片和霍尔开关芯片；前者输出模拟量，后者输出数字量。按照检测对象的性质可将它们分为：直接应用和间接应用；直接应用是指直接检测被测对象的磁场或磁特性，间接应用是指将非电、非磁物理量如力、力矩、位移、加速度、角度、角速度、转速、转数以及工作状态的变化周期等转化成磁场进行检测。霍尔芯片广泛地应用于汽车电子、计算机、工业控制系统、电能表[1]和消费电子类等。最近亚微米的霍尔芯片在各种纳米药物和分子生物学的检测应用中得到了越来越多的重视[2]。

2010 年霍尔传感器总市场价值为 7.7 亿美元，而到 2016 年预期将达到 14 亿美元，期间以 8.7% 年均增长率保持增长。正是因为霍尔传感器重要的作用和广阔的市场，美、日、英、法、德等发达国家把霍尔传感器技术列为国家重点发展技术，竞争传感器技术制高点。

如图 1 所示，一般的霍尔芯片系统都是由磁场系统、霍尔盘(霍尔元件)和信号处理电路组成。磁场系统可以把输入信号转化为磁场信号，霍尔盘把磁场信号转换为电信号，信号处理电路把霍尔盘输出信号转换为满足应用的信号。

2. 技术难点

霍尔效应是美国物理学家霍尔(A. H. Hall)于 1879 年在研究金属的导电机制时发现的，当电流垂直于外磁场通过导体时，由于受洛伦兹力的影响，在导体的垂直于磁场和电流的方向的两个端面会出现电势差，这一现象就是霍尔效应[3]。

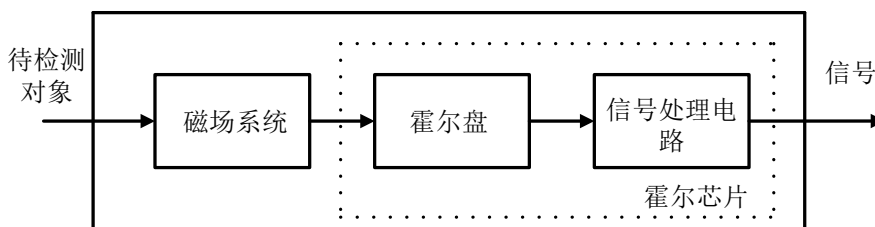


Figure 1. Hall chip system composition block

图 1. 霍尔芯片系统的组成方块图

霍尔芯片的主要指标有：灵敏度、精确度、温度漂移、失调、线性度、动态范围等。对磁场精度要求不高的霍尔芯片已经有一批相当成熟的产品，但是霍尔盘的缺陷限制了其在高精度测量场合中的应用。温度漂移和失调电压是霍尔盘最主要的缺陷[4]，温度漂移使霍尔传感器的线性度变差，失调电压易使处理电路饱和，影响测量范围。

研究者主要从两个方面改进霍尔芯片性能：霍尔盘、信号处理电路。

2.1. 霍尔盘

理想霍尔盘应该具有高灵敏度、无失调电压、无温度漂移的特点。但在实际应用中，由于霍尔盘制造工艺的误差，会有一些的失调电压，同时制作霍尔盘的材料受温度影响，会使灵敏度和失调电压随温度变化[5]。选择合适的霍尔盘材料可以减小灵敏度和失调电压的温度漂移。同时合适的霍尔盘形状，也可以减小制造误差，从而减小失调电压。

根据霍尔效应可知，任何四端口导电的材料都可以产生霍尔电势。但并不是任何材料，任何形状的霍尔盘都可以在实际中应用。在实际应用中，霍尔盘应有高的灵敏度和低的失调电压。霍尔效应最初是在研究金属时发现的，但是由于金属中电子浓度很高，霍尔效应很弱，金属不适合作为霍尔盘的材料[6]。在 20 世纪 40 年代中期，随着半导体技术的出现，半导体用作霍尔盘的材料得到了很大的发展。在半导体材料中，电子迁移率比较高的有 InSb 和 InAs，大约为 $8 \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $3.3 \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ，但是它们的禁带宽度非常窄，分别为 0.18 eV 和 0.36 eV。所以，它们的温度性能比较差，对后续温度漂移补偿电路的要求较高。Si 和 GaAs 的禁带宽度分别为 1.12 eV、1.42 eV，在温度达到 125℃时还不会进入本征激发区，非常适合作为霍尔盘的材料。但是，对于霍尔芯片有一个严酷的要求，就是价格低，即高的性能价格比，GaAs 材料造价非常高[7]，与传统 CMOS 制造工艺不兼容。硅霍尔集成电路可将霍尔元件及信号处理电路集成在同一个芯片上，且适于和各种逻辑电路直接接口，使用非常方便，因而硅工艺霍尔芯片得到了广泛应用[8]。研究高性能低成本易于集成的霍尔盘材料仍是一个研究热点。

霍尔盘的几何形状会影响霍尔盘灵敏度和失调电压漂移，为方便信号采集和后续处理，霍尔盘一般都设计成对称形式，有方型、圆型、八角型和十字交叉型等。M. A. Paun 提出了 12 种霍尔盘的设计[9]，其中十字交叉型霍尔盘性能相对优越，如图 2 所示。

2.2. 失调电压消除

由于制造工艺误差和外界环境变化[10]，在外界磁场强度为零时，霍尔盘会有一个不为零的输出电压，这个电压就是霍尔盘失调电压。霍尔盘的失调是霍尔盘与生俱来的，本身无法消除，必须通过后续处理电路消除。H. Blanchard 提出了一种静态正交耦合消除失调电压的方法[11]，这种方法的思想是从互相垂直的两个方向向霍尔盘注入电流时，失调电压的极性相反。因而，可以使用两个完全相同的霍尔盘，从两个垂直方向输入电流，把输出进行相加，从而可以消除失调电压。图 3 表示了正交耦合方法的连接方式。

但这种方法的缺点是：由于工艺制造的误差，霍尔盘会有一些的差别，失调电压不可能完全消除。Paun 采用了旋转电流技术，很大程度上抑制了失调电压，图 4 表示了两个相位的旋转电流技术，表 1 表示了失调电压补偿分别比较。

2.3. 温度漂移补偿

霍尔盘的灵敏度会随着温度、器件老化和压力[12]而变化，特别是器件完成封装之后这些效应的影响会加强[13]。图 5 表示一个未封装的霍尔盘灵敏度随温度变化的曲线[14]。

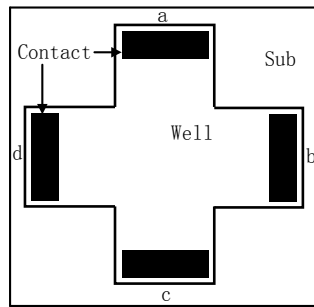


Figure 2. Cross Hall plate
图 2. 十字交叉型霍尔盘

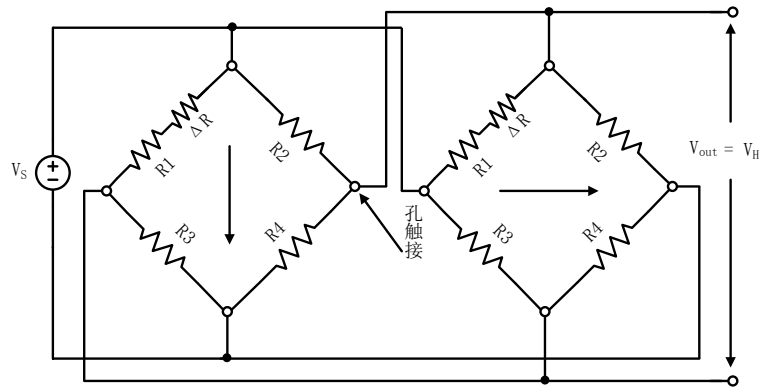
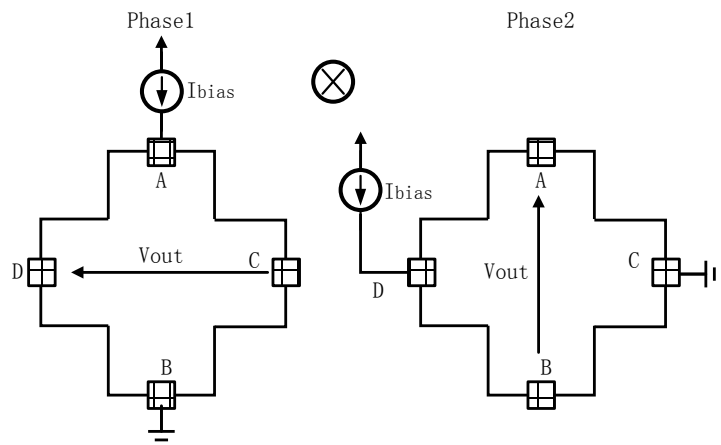


Figure 3. Orthogonally coupled symmetrical Hall plates
图 3. 正交耦合方式连接的霍尔盘



$$V_{\text{sensor}[1]} = +S_I \cdot I_{\text{bias}} \cdot B_{\text{ext}} + V_{\text{off}} \quad V_{\text{sensor}[2]} = -S_I \cdot I_{\text{bias}} \cdot B_{\text{ext}} + V_{\text{off}}$$

Figure 4. Two phase spinning current technology
图 4. 两个相位的旋转电流技术

Table 1. Offset voltage compensation compared
表 1. 失调电压补偿分别比较

	十字交叉型霍尔盘(未补偿)	正交耦合方法	旋转电流技术
等效失调磁场	±50 mT	±2 mT, ±5 mT	±30 uT
参考文献	[11]	[11]	[9]

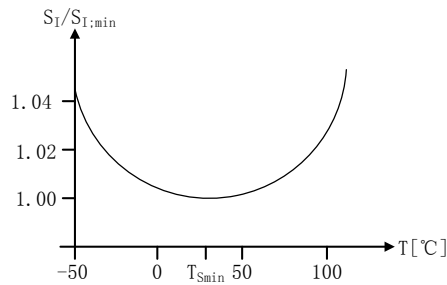


Figure 5. Typical temperature drift of the sensitivity
图 5. 灵敏度随温度的变化

霍尔盘灵敏度的漂移会影响霍尔芯片的线性度，限制霍尔芯片在高精度测量场合中的应用。许多高校和公司都提出了解决方法，LEM 公司采用了查表法补偿霍尔盘的温度漂移[15]。首先，测出霍尔盘灵敏度变化量与温度变化量的关系，存储在寄存器中。当温度变化时，根据温度变化量，从寄存器中得到灵敏度变化量，用该值补偿灵敏度温度漂移。此方法属于开环补偿。另外一种方法是闭环回路补偿[16]，其方法是：在芯片内部能够产生一个不随温度变化参考磁场，此参考磁场通过霍尔盘产生参考电压，通过反馈回路使该参考电压不随温度变化，同时补偿掉敏感度的温度漂移。该方法还可以补偿由于器件老化和压力带来的灵敏度漂移。表 2 对比了两种灵敏度校准方法的效果。

但是，在闭环控制中需要一个高精度 Sigma-Delta ADC，相对于其它种类的 ADC，Sigma-Delta ADC 的主要优点是其可以达到很高的精度，一个典型的例子是 Sigma-Delta ADC 只需要一个 1 比特 ADC 就可以得到一个精度超过 16 bit 的 Sigma-Delta ADC [18]。Sigma-Delta ADC 的设计关键在于过采样技术和噪声整形技术，相对于奈奎斯特采样，过采样可以降低信号带宽内的噪声，提高信噪比。图 6 显示了在不同采样频率下的量化噪声功率谱密度。

从上图可以看出，采样频率越高，留在信号基带内的噪声越低，精度也就越高。但是也意味着电路需要在更高的频率下运行，是用速度去换精度。噪声整形技术可以进一步减小信号带内的量化噪声，把噪声集中到带外[19]。

从图 7 可以看出，通过噪声整形技术，把量化噪声移到高频处，留在信号带内噪声非常低，可以有效提高 ADC 的精度。但这需要设计性能优越的环路滤波器，电路要求较高。在霍尔芯片闭环回路控制中应用的 Sigma-Delta ADC 需要更高的精度，不仅要考虑量化噪声，也要考虑电路本身所带来的噪声包括闪烁噪声和热噪声。如果，能够去除这部分噪声可以极大的提高 Sigma-Delta ADC 的精度，但这对电路提出了相当高的要求，比较难以实现。高精度 Sigma-Delta ADC 的设计是霍尔芯片设计难点之一。

3. 霍尔芯片发展趋势

霍尔传感芯片是全球名列前茅的传感器产品，在全球磁场传感器市场所占份额超过了 70%，它被广泛应用到工业、汽车业、电脑、手机以及新兴消费电子领域。未来几年，随着越来越多的汽车电子和工业设计企业转移到中国，霍尔传感器芯片在中国的年销售额将保持 20%到 30%的高速增长。与此同时，霍尔传感器芯片相关的技术仍在不断完善，呈现出高集成度、低温度性漂移、高灵敏度、低失调电压、新型的霍尔元件结构、微型化发展趋势。

1) 高集成度

霍尔器件可以分为：霍尔元件和霍尔芯片两大类。前者是一个简单的霍尔盘，使用时常常需要将获得霍尔电压进行放大处理，后者将霍尔盘和它的信号处理电路集成在同一个芯片上。霍尔器件的发展方向就是采用 CMOS 工艺实现高度集成化，可以把预处理电路包括前置放大器、失调补偿、温度漂移补偿、

Table 2. Sensitivity calibration			
表 2. 灵敏度校准效果			
	十字交叉型霍尔盘(未校准)	查表法	闭环回路补偿方法
灵敏度漂移	500 ppm/°C~1000 ppm/°C	300 ppm/ °C	50 ppm/ °C
参考文献	[17]	[15]	[16]

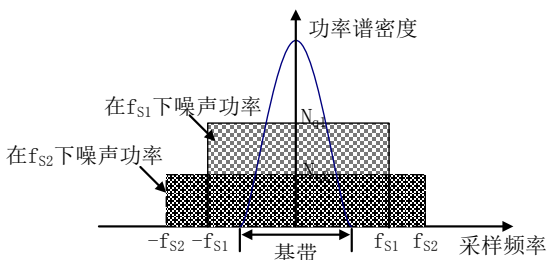


Figure 6. Power spectral density of quantization noise (Nyquist sampling and oversampling)
 图 6. 量化噪声功率谱密度(奈奎斯特频率和过采样频率下的情况)

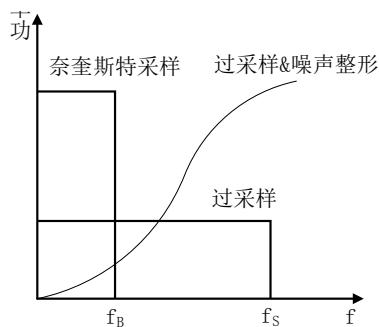


Figure 7. Power spectral density in three circumstances
 图 7. 三种情况下的量化噪声功率谱密度

基准电压集成在同一块芯片上，同时还可以集成许多附加功能，如数据存储、A/D 转换器、总线接口等。而为了实现可编程霍尔芯片，厂商将 EEPROM 集成到芯片中也是一种发展趋势，可编程霍尔芯片可以降低客户生产环节的失败率，缩短生产周期，提高生产率。

2) 低温度漂移

霍尔芯片的灵敏度和失调电压都会随着温度变化，灵敏度漂移会影响霍尔芯片线性度，失调电压漂移会影响芯片上电重复性误差。温度漂移会影响霍尔盘的线性度及测量精度。在要求高线性度和高精度测量的场合中，设计低温度漂移的霍尔芯片是其发展趋势。

3) 高灵敏度

霍尔芯片的挑战之一就是其能够检测非常小的磁场及磁场的细微变化。在需要精确测量磁场的场合，霍尔芯片需要很高的灵敏度。通过改进电路可以对霍尔芯片的灵敏度有一定程度上的提高，但是对电路的要求特别高，代价较大。有文献提出可以在芯片表面集成磁场集中器，利用微电子集成工艺在硅片上集成磁场集中器，再将硅片切割封装成标准的集成电路芯片。这种集成化的磁场集中器虽然会稍微增加霍尔芯片的成本，但可以使霍尔芯片的灵敏度提高五倍以上。

4) 低失调电压

霍尔盘的失调电压会影响霍尔芯片的动态监测范围，并且失调电压会随着温度等外界因素的变化，

使得芯片每次上电时霍尔失调电压不相等,影响测量精度每次上电需要软件校准。所以,减小失调电压的大小及减小芯片上电重复性误差是霍尔芯片使用中需要解决的问题。

5) 霍尔盘新型结构

一般的霍尔芯片只对垂直于霍尔盘表面的磁场敏感,这种霍尔芯片叫做平面霍尔芯片,为了能够测量和传感平行于霍尔芯片的磁场,国外许多高校、研究所和公司开发出了垂直霍尔芯片[20]。最近,英飞凌推出新型的垂直霍尔芯片,适用于转向及速度侦测,新元件创全球先例,将内部霍尔盘的方向由水平转为垂直,可灵敏侦测平面方向磁场,90°转向的设计提供了更多弹性,更适用于局限空间的应用。在此基础上,研制出了二维和三维霍尔芯片。二维霍尔芯片可以检测二维磁场的大小和方向,可用在各种飞行器上做导航装置;三维霍尔芯片可检测空间任意一点的磁场三维分量和该磁场的方向,适用于地质勘探、航海、航空、航天地磁场图的精确绘制等方面。

6) 微型化

市场上许多霍尔芯片都采用了各种小型封装,实现霍尔芯片的微型化,这种芯片特别适用于空间窄小的检测环境,例如电动机中的间隙、磁力轴承等。Allego Microsystem 推出的创新性封装设计,ACS711 采用尺寸仅为 3 mm × 3 mm、厚度为 0.75 mm 的超薄 QFN 封装。

除了上述发展趋势,如何降低功耗等也是霍尔芯片的发展方向。

致 谢

本工作由国家电网公司科技项目资助,合同号:SGZJ0000BGJ1400211。

参考文献 (References)

- [1] 秦波,孙传友(2007)霍尔式数字电度表设计. *科技资讯*, **2**, 11.
- [2] Andrea, P.A. (2013) Fully integrated calibration for high-performance Hall Sensor Microsystems. Ph.D. Dissertation, EPFL, Lausanne.
- [3] Popovic, R.S. (2004) Hall effect devices. Second Edition, Institute of Physics Publishing, London.
- [4] Pastre, M. Kayal, M. and Blanchard, H. (2007) A Hall sensor analog front end for current measurement with continuous gain calibration. *IEEE Sensor Journal*, **7**, 860-867.
- [5] Simon, P., Vries, P. and Middelhoek, S. (1996) Autocalibration of silicon Hall devices. *Sensors and Actuators A: Physical*, **52**, 203-207.
- [6] Extance, P. and Pitt, G.D. (1985) GaAs magnetic field sensors. *Transducers'85. 1985 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, New York, 304-307.
- [7] 涂有瑞(1996)磁敏传感器产业的现状和发展趋势. *电子科技学报*, **10**, 28-33.
- [8] Randjelovic, Z.B., Kayal, M., Popovic, R. and Blanchard, H. (2002) Highly sensitive Hall Magnetic Sensors Microsystem in CMOS Technology. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, **37**, 151-159.
- [9] Paun, M.A. (2013) Hall cells offset analysis and modeling approaches. Ph.D. Dissertation, EPFL, Lausanne.
- [10] Ramsden, E. (2006) Hall effect sensors—Theory and applications. 2nd Edition, Elsevier, Amsterdam.
- [11] Blanchard, H. (1999) Hall sensors with integrated magnetic flux concentrators. Ph.D. Dissertation, EPFL, Lausanne.
- [12] Ausserlechner, U., Motz, M. and Holliber, M. (2007) Compensation of the piezo-Hall effect in integrated Hall sensors on (100)-Si. *IEEE Sensors Journal*, **7**, 1475-1482.
- [13] Manic, D., Friedrich, A., Haddab, Y. and Popovic, R. (1997) Influence of assembling procedure on IC parameters. *Proceedings of 21st International Conference on Microelectronics*, **2**, 637-640.
- [14] Randjelovic, Z. (2000) Low-power high sensitivity integrated Hall magnetic sensor microsystems. Hartung-Gorre, Konstanz.
- [15] LEM (2010) Isolated current and voltage transducers. 3rd Edition, LEM Corporate Communications, Geneva.
- [16] Pastre, M. (2005) Methodology for the digital calibration of analog circuits and system-application to a Hall Sensor Microsystem. Ph.D. Dissertation, EPFL, Lausanne.

- [17] Manic, D., Petr, J. and Popovic, R.S. (2000) Short and long-term stability problems of Hall plates in plastic packages. *Proceedings of the 38th Annual 2000 IEEE International Reliability Physics Symposium*, San Jose, 10-13 April 2000, 225-230.
- [18] Aziz, P.V. and Sorensen, H.V. (1996) An overview of sigma-delta converters. *Signal Processing Magazine, IEEE*, **13**, 61-84.
- [19] 韩丹丹 (2009) 应用于 G.712 语音编码和地震信号检测的 $\Sigma \Delta$ 调制器. 硕士论文, 清华大学, 北京.
- [20] Popovic, R.S. (1984) The vertical Hall-effect device. *IEEE Electron Device Len*, EDL-5(1984)3578.