

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003024

30 kA 闭环式集成霍尔电流传感器设计*

王冰¹ 蒋磊¹ 宋福明² 徐跃¹

(1. 南京邮电大学 电子与光学工程学院 南京 210023; 2. 南京邮电大学 科研院 南京 210023)

摘要:基于0.18 μm CMOS工艺设计了一种大量程闭环式集成霍尔电流传感器。采用片内高灵敏度霍尔器件检测待测电流产生的磁场并线性输出霍尔信号,霍尔电压经过线性放大、失调消除和比例积分调节后与三角载波进行比较产生PWM波,驱动全桥式功率放大电路工作。功率放大电路输出的电流送入聚磁环的二次绕组后形成一个闭环的二次侧补偿,使聚磁环气隙中的霍尔器件处于零磁通状态,从而提高了大电流检测的精度。仿真结果表明,所设计的集成霍尔电流传感器的最大测量范围为30 kA,准确度为1级,功耗小于1.08 W,芯片面积仅有0.2 mm^2 。

关键词:闭环集成式霍尔电流传感器;PWM波;失调消除;功率放大;零磁通

中图分类号: TN929.52 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

30 kA closed-loop integrated Hall current sensor design

Wang Bing¹ Jiang Lei¹ Song Fuming² Xu Yue¹

(1. College of Electronic Science & Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;

2. Office of Scientific R&D, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: A large-scale closed-loop integrated Hall current sensor is designed based on the 0.18 μm CMOS technology. The on-chip high-sensitivity Hall device is used to measure the magnetic field generated by the detected current and linearly output Hall signal. After linear amplification, offset cancellation, and proportional integral (PI) regulation, the Hall voltage is compared with the triangular carrier to generate a PWM signal for driving the full-bridge power amplifier. The output current from the power amplifier is then sent to the secondary winding of the magnetic ring to form a closed-loop secondary side compensation, so that the Hall device in the magnetic ring air gap is in a zero magnetic flux state, thereby improving the accuracy of high current detection. Simulation results show that the designed integrated Hall current sensor achieves a high measurement range of 30 kA, the high accuracy level of 1, the low power consumption of 1.08 W, and the low chip area occupation of 0.2 mm^2 .

Keywords: closed-loop integrated Hall current sensor; PWM wave; offset cancellation; power amplifier; zero magnetic flux

0 引言

作为一种非接触磁传感器,霍尔电流传感器具有灵敏度高、精度高、温度漂移小、工作寿命长、可靠性、安全性高等优点^[1],能够准确捕捉电路中磁场的变化,从而对电流变化进行实时的监控。被广泛的应用于逆变装置、电动汽车控制和需要隔离检测电流电压的各个领

域中^[2-5]。

霍尔电流传感器分为开环式和闭环式两种。相较于开环式霍尔电流传感器漏磁大、精度低且存在磁饱和等缺点,闭环式霍尔电流传感器由于其零磁通的工作原理,具有漏磁小、精度和线性度高、响应速度快且不存在磁饱和等优点。通常,闭环霍尔电流传感器采用分立元件设计^[6-7],但其制作复杂、功耗大、体积大且抗干扰能力较差。相较于利用分立元件设计的闭环霍尔电流传感器,

收稿日期:2020-03-24 Received Date: 2020-03-24

* 基金项目:江苏省重点研发计划-社会发展面上项目(BE2019741)、江苏省自然科学基金面上项目(BK20181390)、江苏省高校自然科学基金面上项目(18KJB140008)资助

集成式闭环霍尔电流传感器将所有分立元件集成在一个芯片上,其制造工艺简单且成本低,功耗小、体积小且可靠性高。

本文基于现代 CMOS 集成技术设计了一种大量程集成式闭环霍尔电流传感器。通电导线产生的磁场被磁环聚集,磁环气隙中的霍尔器件检测到磁场后线性输出霍尔信号,经过比例积分调节电路、功率放大电路和反馈回路形成二次侧的补偿电流,使气隙中的霍尔器件处于零磁通状态。整体电路集成在一个芯片上,其测量电流的准确度高、功耗小、面积小,最大测量范围达到 30 kA,使用价值高。

1 闭环霍尔电流传感器的工作原理

闭环霍尔电流传感器又称为磁平衡式霍尔电流传感器^[8],其工作原理如图 1 所示。一次侧的待测电流 i_1 在导线周围产生磁场 B_1 , 被聚磁环聚集,处于聚磁环气隙中的霍尔器件感应到磁场,输出霍尔信号,该信号经线性放大、比例积分等处理后驱动功率放大电路产生二次侧的补偿电流 i_2 。这一电流通过绕在聚磁环上的二次侧侧高匝数绕组,产生与 B_1 方向相反的磁场 B_2 , 使得气隙中的总磁场减小,从而导致霍尔器件输出的霍尔信号减小,直到 $B_2 = B_1$, 气隙中的霍尔器件处于零磁通状态,此时有:

$$N_1 i_1 = N_2 i_2 \tag{1}$$

式中: N_1 为一次侧导体匝数; i_1 为一次侧电流; N_2 为二次侧绕组匝数; i_2 为二次侧电流。在 N_1 、 N_2 已知的情况下,只要测得二次侧电流 i_2 即可得到一次侧电流 i_1 的大小。

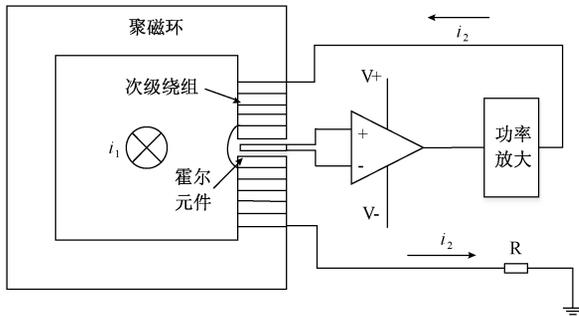


图 1 闭环霍尔电流传感器

Fig. 1 Closed-loop Hall current sensor

2 闭环霍尔电流传感器的设计

图 2 所示为所设计的集成式闭环霍尔电流传感器的整体结构及电路框图,主要包括以下 5 个部分:1) 聚磁环,聚集一次侧电流 I_1 产生的磁场;2) 霍尔信号放大和失调消除电路,线性放大霍尔器件输出的霍尔信号,并消除其失调信号;3) PI 调节电路,对处理后的霍尔信号进行调节;4) PWM 波产生电路,经 PI 调节后的霍尔信号与三角载波相比较产生 PWM 脉宽调制信号;5) 全桥式功率放大电路, PWM 波驱动功率放大电路,产生一定占空比的电压信号,通过反馈回路产生二次侧补偿电流 I_2 。

除其失调信号;3) PI 调节电路,对处理后的霍尔信号进行调节;4) PWM 波产生电路,经 PI 调节后的霍尔信号与三角载波相比较产生 PWM 脉宽调制信号;5) 全桥式功率放大电路, PWM 波驱动功率放大电路,产生一定占空比的电压信号,通过反馈回路产生二次侧补偿电流 I_2 。

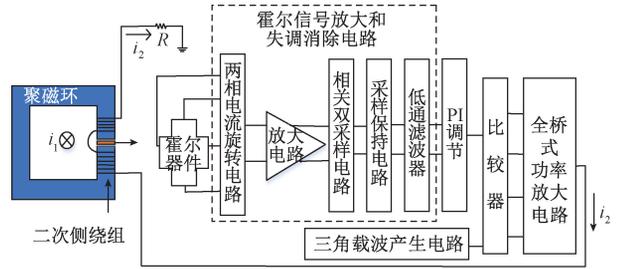


图 2 整体结构及电路框图

Fig. 2 Overall structure and circuit block diagram

2.1 聚磁环的设计

由于一次侧电流产生的磁场较为微弱,难以检测,因此需要设计具有较强聚磁能力的聚磁环。聚磁环的聚磁能力由其材料、尺寸以及气隙宽度来决定。本文利用 COMSOL 软件建立聚磁环的三维仿真模型,设计了一种具有高聚磁能力的聚磁环,并进行有限元仿真,其结构如图 3 所示。聚磁环结构设计为方形,同时在其拐角处做圆角处理,以改善聚磁环拐角处磁场分布不均匀的现象。聚磁环材料选用坡莫合金,因其有高磁导率、低矫顽力等优点^[9]。另外由仿真可知,在聚磁环的气隙处出现磁场发散现象,气隙宽度越宽,磁场发散越严重,因此合理的气隙宽度尺寸是必要的。通过仿真分析将聚磁环尺寸设定在合理的聚磁能力范围内,使其满足霍尔芯片的磁场检测范围,具体尺寸如图 3 所示,外周边长 60 mm×60 mm,内周边长 40 mm×40 mm,厚度 20 mm,气隙宽度为 0.8 mm。

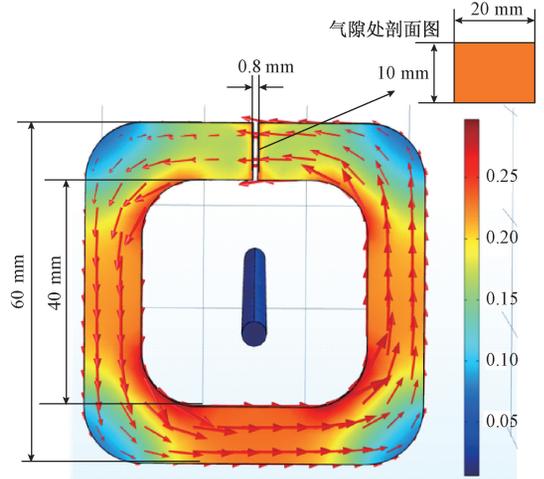


图 3 方形聚磁环磁场仿真

Fig. 3 Simulation of the magnetic field of a square magnetic ring

本文采用等安匝法^[10],用 0~300 A 的一次侧电流模拟 0~30 kA 的实际待测电流。给通电导线通入 0~300 A 的一次侧电流,分析并计算气隙处磁感应强度,其仿真数据由表 1 所示。可以看到当待测电流的范围在 0~300 A 时,其气隙中的磁场在 0~150 mT,且气隙中的磁场强度随电流的增加线性增加,满足霍尔器件所能检测的磁场范围,提高了霍尔器件检测磁场的精度。

表 1 方形聚磁环磁感应强度分布表

Table 1 Square magnetic ring magnetic induction intensity distribution table

| 序号 | 电流/A | 磁感应强度/mT |
|----|------|----------|
| 1 | 4 | 2 |
| 2 | 10 | 5 |
| 3 | 30 | 15 |
| 4 | 60 | 30 |
| 5 | 90 | 45 |
| 6 | 120 | 60 |
| 7 | 150 | 75 |
| 8 | 200 | 100 |
| 9 | 240 | 120 |
| 10 | 280 | 140 |
| 11 | 300 | 150 |

2.2 霍尔器件

选择高灵敏度的十字形霍尔器件检测聚磁环气隙中的磁场,输出霍尔电压。灵敏度、失调和信噪比是其重要性能参数。所设计的霍尔器件如图 4 所示,在 P 型硅衬底上形成十字形的 N 阱有源区,并在 N 阱有源区靠近边界处放置 4 个 90°对称的 N+接触孔,每个 N+接触孔都扩展到 N 阱的边界以减小器件的失调。测试结果表明,当霍尔器件的 L/W 为 0.4 时,具有最高灵敏度 $3.2\%T^{-1}$ 、最低失调 6 mV 和最大信噪比 4 dB^[11]。因此,本文选用 L/W 为 0.4 的十字形霍尔器件作为磁场检测器件。

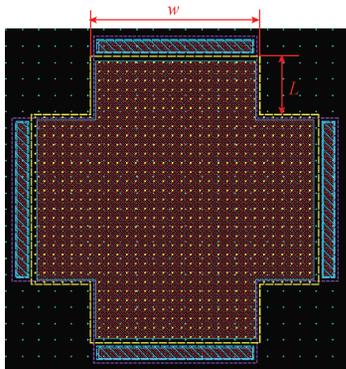


图 4 十字形霍尔器件版图

Fig. 4 Cross-shaped Hall device layout

2.3 霍尔信号放大和失调消除电路

由于霍尔器件输出的霍尔信号较为微弱,并且伴有

严重的失调以及 $1/f$ 噪声,因此采用二相旋转电流技术对霍尔信号进行处理^[11-12]。图 2 虚线框内电路为本文所设计的霍尔信号放大和失调消除电路,包括两相电流旋转电路、放大电路、相关双采样保持电路、采样保持电路和低通滤波电路。其中,两相电流旋转电路的具体结构如图 5 所示。 $M_1 \sim M_8$ 为 8 个完全相同的 NMOS 开关管,由互补的时钟信号 clk_1 和 clk_2 控制,在时钟的控制下进行两相电流旋转操作。当 clk_1 为高电平、 clk_2 为低电平时, $M_1、M_3、M_5、M_7$ 导通, $M_2、M_4、M_6、M_8$ 截止,偏置电流从端口 a 流向端口 c,端口 b、d 输出霍尔电压 $+V_h$ 和失调电压 $+V_{op}$,称为第 1 相信号。当 clk_2 为高电平、 clk_1 为低电平时, $M_2、M_4、M_6、M_8$ 导通, $M_1、M_3、M_5、M_7$ 截止,偏置电流从端口 b 流向端口 d,端口 a、c 输出霍尔电压 $-V_h$ 和失调电压 $+V_{op}$,称为第二相信号。可以看到当两个时钟控制信号发生高低电平周期性变换时,输出的霍尔电压信号 V_h 极性随之周期性变化,而失调电压信号 V_{op} 极性不变。将混叠有霍尔电压和失调电压的信号送入后续放大电路进行线性放大,放大后的信号进入相关双采样保持电路,相关双采样保持电路对第 1 相和第 2 相的信号执行相减操作,此时,具有相同极性的失调电压信号被移除,获得两倍的霍尔电压信号,最后通过低通滤波器去除霍尔信号中混入的高频成分,恢复霍尔信号。

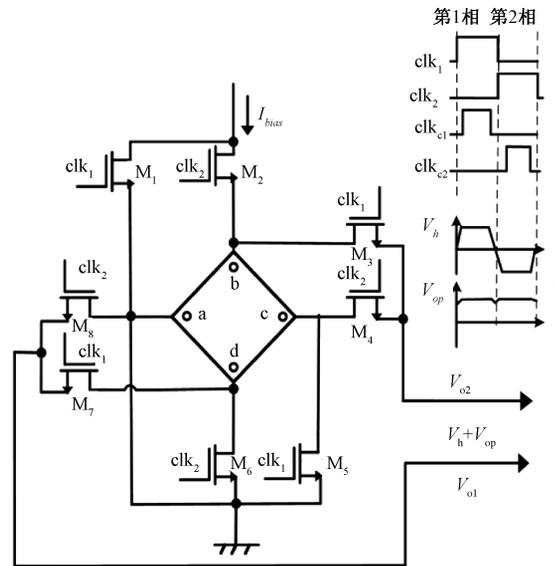


图 5 霍尔信号放大和失调消除电路

Fig. 5 Hall signal amplification and offset cancellation circuit

2.4 PI 调节及 PWM 波产生电路

设计的 PI 调节及 PWM 波产生电路如图 6 所示。其中 PI 调节电路是反馈控制电路,由比例控制电路和积分控制电路两部分并联组成,最后通过放大器将比例及积分电路输出的结果倒向并合成,经 PI 调节后的霍尔信号与三角载波通过比较器比较后,产生一定占空比的 PWM

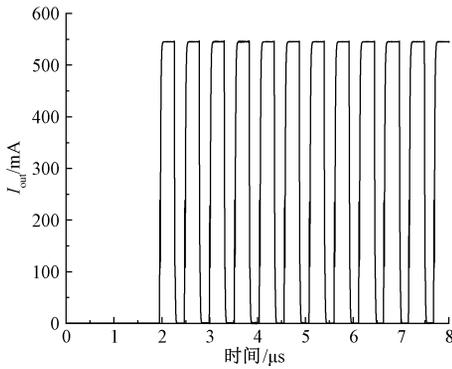


图 9 功率放大电路输出最大电流

Fig. 9 Maximum output current of the power amplifier circuit

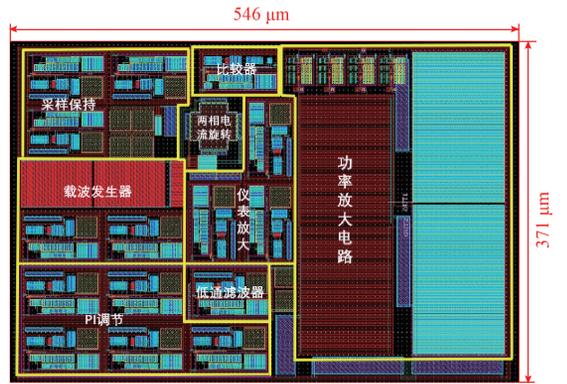


图 10 闭环霍尔电流传感器版图

Fig. 10 Closed-loop Hall current sensor layout

30 kA,最大相对误差为 0.72<1,即准确度达到 1 级。

表 2 电流仿真数据

Table 2 Current simulation data

| I_1/kA | i_1/A | I_2/A | i_2/mA | ξ |
|----------|---------|---------|----------|-------|
| 0.4 | 4 | 3.97 | 3.97 | 0.72% |
| 1 | 10 | 9.93 | 9.93 | 0.69% |
| 3 | 30 | 29.81 | 29.81 | 0.62% |
| 6 | 60 | 59.75 | 59.75 | 0.58% |
| 9 | 90 | 89.54 | 89.54 | 0.51% |
| 12 | 120 | 119.40 | 119.40 | 0.47% |
| 15 | 150 | 150.60 | 150.60 | 0.42% |
| 20 | 200 | 199.30 | 199.30 | 0.35% |
| 24 | 240 | 239.40 | 239.40 | 0.27% |
| 28 | 280 | 279.60 | 279.60 | 0.14% |
| 30 | 300 | 300.30 | 300.30 | 0.10% |

3.2 版图设计

基于中芯国际(SMIC)0.18 μm 标准 CMOS 工艺,采用 Cadence 工具绘制了闭环集成霍尔电流传感器的版图,整体版图及布局如图 10 所示。采用 1 层多晶硅和 6 层金属层进行布局布线,其中两相电流旋转电路中的霍尔器件选用 $L/W=0.4$ 的高灵敏度十字形水平霍尔器件, $L=20 \mu m, W=50 \mu m$ 。为减小运放的失调,差分对管按照中心对称的排布走线,另外分别将 PMOS 管和 NMOS 管用保护环包围起来防止闩锁效应。考虑到制造工艺的偏差和版图布局对芯片性能的影响,各个模块电路版图的绘制严格遵循设计规则,并按照信号的走向进行布局摆放。整体芯片面积为 $546 \mu m \times 371 \mu m$ 。

4 测量处理

所设计的聚磁环留有气隙,将键合封装好的整块霍尔传感器芯片插入其中,使气隙中的磁场垂直于传感器,传感器留有引脚端子,可接电源、地等其他外接信号,为传感器芯片供电。输出端子外接精密电阻,通过测量电

阻两端的电压信号来计算出二次侧电流值^[15]。

在测量电流时,将一次侧通电导线放置于传感器的内孔中心,尽可能不要放偏,否则会使聚磁环磁通量分布不均匀,影响测量精度。霍尔电流传感器使用时,其周围不宜有强磁场;在一般环境下使用霍尔电流传感器,由于外部干扰磁场很微小,基本不会影响其测量精度。

5 结论

基于 SMIC 0.18 μm CMOS 工艺设计了一种大量程闭环集成霍尔电流传感器。设计了具有较强聚磁能力的方形聚磁环,利用霍尔信号放大和失调消除电路输出与待测电流所产生的磁场成线性关系的霍尔信号,该信号经 PI 调节后,与三角载波比较输出 PWM 波驱动全桥式功率放大电路,其输出的最大电流为 300 mA。仿真结果表明,所设计霍尔电流传感器的电流测量范围为 30 kA,准确度为 1 级,功耗低至 1.08 W,芯片面积仅为 0.2 mm^2 。闭环式电流传感器可应用于各个领域,如核聚变,智能仪表,工业应用和医疗设备等领域中。

参考文献

[1] RICHARD D, SHAUN M. Isolated open loop current sensing electronic engineering [J]. Electronic Engineering, 2002 (11): 15-20.

[2] 严加斌,朱峰,李军,等. 高速动车组速度传感器的电磁干扰测试与分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(3): 433-438.

YAN J B, ZHU F, LI J, et al. Electromagnetic interference measurement and analysis of high-speed electric multiple units speed sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29 (3): 433-438.

[3] 兰羽,张顺星. 基于霍尔传感器的转速系统设计[J].

- 电子测量技术,2013,36(12):84-86.
- LAN Y,ZHANG SH X. The design of speed system based on Hall sensor[J]. Electronic Measurement Technology, 2013,36(12):84-86.
- [4] 肖国焘,徐志伟,黄伟,等. 基于 LabVIEW 的变体机翼控制系统研究[J]. 国外电子测量技术,2014,33(5):80-85.
- XIAO G T, XU ZH W, HUANG W, et al. Research on control system of a morphing wing based on LabVIEW [J]. Metrology & Measurement Technique, 2014, 33(5):80-85.
- [5] 文玉梅,孙登峰,李平,等. 自全式无线霍尔电流传感器[J]. 仪器仪表学报,2014,35(8):1700-1706.
- WEN Y M, SUN D F, LI P, et al. Self-contained wireless Hall current sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(8):1700-1706.
- [6] 武旭,王林森,居鹏. 闭环霍尔电流传感器的硬件电路设计[J]. 传感器与微系统,2018,37(11):73-76.
- WU X, WANG L S, JU P. Hardware circuit design of closed-loop Hall current sensor [J]. Sensors and Microsystems, 2018, 37(11):73-76.
- [7] 赖俊驹,彭浩,胡金磊,等. 基于闭环霍尔效应的电流传感器设计[J]. 新型工业化,2018,8(9):1-5.
- LAI J J, PENG H, HU J L, et al. Design of current sensor based on closed-loop Hall effect [J]. New Industrialization, 2018, 8(9):1-5.
- [8] 李泽勇,王文生. 20 kA 闭环霍尔电流传感器在核聚变装置供电电源系统中的应用[J]. 电源世界,2006(11):52-54.
- LI Z Y, WANG W SH. Application of 20 kA closed-loop Hall current sensor in power supply system of nuclear fusion device [J]. The World of Power Supply, 2006(11):52-54.
- [9] 李玲龙. 霍尔直流大电流传感器设计与研究[D]. 武汉:华中科技大学,2017.
- LI L L. Design and research of Hall DC high current sensor [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [10] 潘峤. 30 kA 霍尔电流传感器驱动电路优化设计[D]. 合肥:中国科学技术大学,2017.
- PAN Q. Optimal design of driving circuit of 30kA Hall current sensor [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.
- [11] XU Y, HU X X, JIANG L. An analytical geometry optimization model for current-mode cross-like Hall plates[J]. Sensors, 2019, 19(11):2490.
- [12] 黄海云,王德君,徐跃. CMOS 集成 2D 垂直型霍尔传感器电路设计[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(9):1295-1301.
- HUANG H Y, WANG D J, XU Y. Circuit design of CMOS integrated 2D vertical Hall sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(9):1295-1301.
- [13] 徐跃,杨英强. 无刷直流振动电机驱动电路设计[J]. 微电子学,2010,40(3):354-357.
- XU Y, YANG Y Q. Design of driving circuit of brushless DC vibration motor [J]. Microelectronics, 2010, 40(3):354-357.
- [14] XU Y, PAN H B, An improved equivalent simulation model for CMOS integrated Hall plates [J]. Sensors, 2011(11):103-109.
- [15] 潘峤,许留伟,蒋力. 一种零磁通霍尔电流传感器驱动电路设计[J]. 仪表技术与传感器,2018(2):28-30.
- PAN Q, XU L W, JIANG L. Design of a zero-flux hall current sensor drive circuit [J]. Instrument Technology and Sensor, 2018(2):28-30.

作者简介



王冰, 2019 年于安庆师范大学获得学士学位, 现为南京邮电大学硕士研究生, 主要研究方向为 CMOS 集成霍尔传感器。

E-mail:735853662@qq.com

Wang Bing received B. Sc. degree from Anqing Normal University in 2019. She is currently a M. Sc. candidate at Nanjing University of Posts and Telecommunications. Her main research interest is CMOS integrated Hall sensors.



蒋磊, 现为南京邮电大学攻读硕士学位, 主要研究方向为 CMOS 集成霍尔传感器。

Jiang Lei is a M. Sc. candidate at Nanjing University of Posts and Telecommunications. His main research interest is CMOS integrated Hall sensors.



徐跃, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为 CMOS 集成霍尔传感器和光电集成探测器。

Xu Yue, doctor, professor, and M. Sc. supervisor. His main research interests include CMOS integrated Hall sensors and photoelectric integrated detectors.