

# GaN基异质结霍尔传感器封装测试与输出特性

马凯鸣<sup>1</sup>,代建勋<sup>1</sup>,张 卉<sup>1</sup>,丁喃喃<sup>1</sup>,孙 楠<sup>1</sup>,孙仲豪<sup>1</sup>,刘艳红<sup>2</sup>,Yung C Liang<sup>3</sup>,黄火林<sup>1\*</sup>

(1. 大连理工大学光电工程与仪器科学学院, 辽宁大连 116024; 2. 大连理工大学物理学院, 辽宁大连 116024;

3. 新加坡国立大学电气与计算机工程系, 新加坡 119260)

**摘要:** 霍尔传感器作为磁传感领域最常用的传感器类型,在工业生产、汽车电子、航空航天以及生物医学等方面均有广泛应用. 本文利用宽禁带氮化镓(GaN)半导体耐高温、高迁移率等优点,采用标准半导体芯片制造工艺研制出AlGaIn/GaN异质结结构霍尔传感器. 高温应用环境下的传感器要求封装材料耐高温、产生应力低以及对传感器关键指标影响小. 本文通过软件仿真树脂橡胶类3种不同封装材料封装后对传感器及键合线的性能影响规律,并通过实验验证不同材料封装前后传感器灵敏度、失调电压、温漂系数等物理参数的变化,遴选出综合性能最优的、可在550 K高温环境下使用的封装材料. 最终得到封装后的霍尔传感器失调电压在1.0 mA激励电流时小于115  $\mu$ V,信号线性度在0~3.0 mA激励电流和0~1.0 T磁场测量范围内优于0.3%,而温漂系数在300~550 K温度范围内仅有-120.9 ppm/K,优于目前文献报道结果,因此有望应用于极端环境磁场检测中.

**关键词:** AlGaIn/GaN异质结;霍尔传感器;封装;金丝键合;高温稳定性

**基金项目:** 国家自然科学基金(No.61971090, No.62101093);辽宁省应用基础研究计划(No.2022JH2/101300259);大连市科技创新基金(No.2022JJ12GX011)

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)08-2737-09

电子学报URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI:10.12263/DZXB.20230262

## Package Test and Output Characteristics of GaN-Based Hetero Junction Structure Hall Sensors

MA Kai-ming<sup>1</sup>, DAI Jian-xun<sup>1</sup>, ZHANG Hui<sup>1</sup>, DING Nan-nan<sup>1</sup>, SUN Nan<sup>1</sup>, SUN Zhong-hao<sup>1</sup>,  
LIU Yan-hong<sup>2</sup>, LIANG Yung C<sup>3</sup>, HUANG Huo-lin<sup>1\*</sup>

(1. School of Optoelectronic Engineering and Instrumentation Science, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. School of Physics, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

3. Department of Electrical and Computer Engineering, National University of Singapore, Singapore 119260, Singapore)

**Abstract:** As the most commonly used sensor type in the field of magnetic sensing, Hall sensors have been widely used in industrial production, automotive electronics, aerospace, biomedicine and many other fields. In this work, the AlGaIn/GaN heterojunction Hall sensor was developed by using the standard semiconductor chip manufacturing process, taking advantage of the high temperature tolerance and high mobility of wide-bandgap GaN semiconductor. The sensor in high temperature application environment requires the packaging material to resist high temperature, produce low stress and have little impact on the key indicators of the device. In this work, the influence mechanism of three different packaging materials on the performance of the sensor and the bonding wire is simulated, the changes of sensor sensitivity, offset voltage, temperature drift coefficient and other physical parameters before and after packaging with different packaging materials are verified by experiments. Finally, the packaging material with the best comprehensive performance and can be used in 550 K high temperature environment is selected. The offset voltage of the final packaged Hall sensor is less than 115  $\mu$ V when the excitation current is kept at 1.0 mA, and the signal linearity is better than 0.3% in the range of 0~3.0 mA input current and 0~1.0 T magnetic field. The temperature drift coefficient is only -120.9 ppm/K in the temperature range of 300~550 K, which is better than the results reported in the literatures. The fabricated Hall sensor is expected to be applied in the magnetic field detection in extreme environments.

Key words: AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterojunction; Hall sensor; package; high temperature stability; wire bonding

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.61971090, No.62101093); Applied Basic Research Project of Liaoning Province (No.2022JH2/101300259); Dalian Science and Technology Innovation Fund (No.2022JJ12GX011)

## 1 引言

霍尔传感器是磁传感器中占比最高、应用领域最广的传感器,具有高精度、低功耗、低成本、测量范围大等优点.在汽车电子、工业生产、航空航天、生物医疗等领域均有广泛的应用<sup>[1-4]</sup>. Ga<sub>N</sub>材料凭借其宽禁带(3.4 eV)的特性,具有优良的高温稳定性,利用 Ga<sub>N</sub>材料制作的霍尔传感器可以稳定地工作在高温环境中<sup>[5-7]</sup>. AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>异质结材料在没有掺杂的情况下就可以在异质结界面形成高浓度的二维电子气( $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 左右),由于二维电子气只能在水平方向移动,且形成过程无需掺杂,所以异质结材料界面沟道内的二维电子气具有较高的载流子迁移率( $2\,000 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 左右)<sup>[8,9]</sup>. 因为 Ga<sub>N</sub>材料具有上述特性,所以以 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>异质结为基础制作的霍尔传感器具有无需掺杂的较高电子浓度和电子迁移率,从而有较高的霍尔电压以及灵敏度,且在高温下性能变化较小<sup>[10-12]</sup>,可以应用在对测量精度需求高并且环境恶劣的场景中,如井下电流探测、核电站、航空航天,在这些应用场景中均需传感器稳定工作在 200 °C 以上的高温中,这是传统 Si 基等材料霍尔传感器无法做到的.

目前,国际上有一部分课题组对基于 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>异质结材料的霍尔传感器展开相关研究,但是工作温度大多小于 525 K<sup>[2,10,13,14]</sup>,失调电压(外部磁场为 0 时传感器的输出电压)在 1.0 mA 激励电流时高于 6.5 mV<sup>[14]</sup>,这并没有达到 Ga<sub>N</sub>材料应有的性能.在实际使用时,霍尔传感器无法直接利用裸芯片完成复杂磁场环境测试,尤其是在高温环境中,因此可以保护 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>异质结结构霍尔传感器且对性能影响较小、能使传感器工作在高温环境中的封装就尤为重要.传感器封装中比较常用的封装材料有金属、陶瓷、塑料等,其中金属封装对磁场有屏蔽效果,不利于应用在霍尔传感器等磁传感器中,陶瓷封装较为复杂且价格昂贵,封装过程中容易产生较大应力影响传感器性能.树脂橡胶等塑料类的封装材料封装方便且性能较好,因此本文选取了几种不同的树脂橡胶类封装材料研究其对 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>异质结结构霍尔传感器各方面性能的影响.由于 Ga<sub>N</sub>基异质结霍尔传感器尚处于起步研究阶段,国内外相关研究内容仍较少,还没有专门对 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>异质结结构霍尔传感器封装方面的相关研究.下面列举了部分国外学者做过的一些封装材料对传统 Si 基体材料霍尔传感器的影响. Fischer 等<sup>[15]</sup>通过仿真模拟研究了封装材料杨氏模量及热膨胀系数等参

数和几何厚度对封装应力的影响,进一步发现封装应力和温度对 Si 基体材料霍尔传感器有较大影响. Van der Meer 等<sup>[16]</sup>研究了低成本环氧树脂材料封装对利用旋转电流法去失调的 Si 基霍尔传感器残余失调电压的影响,并对封装后的传感器进行反复热冲击观察对传感器失调电压的作用,发现低成本环氧树脂材料可以较小地影响传感器性能. Manic 等<sup>[17]</sup>研究了环氧树脂和硅橡胶材料封装的 Si 基霍尔传感器在 400 K 温度内灵敏度随温度升高的变化,硅橡胶封装导致的灵敏度变化较小.以上研究均说明和强调了封装对霍尔传感器的失调电压和灵敏度的巨大影响,尤其是在高温情况下.不过上述研究均只是研究了部分封装材料对部分传感器性能的影响,没有进行关于多种材料和材料参数、多种传感器性能、外部键合线的系统研究,对 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>异质结材料霍尔传感器的封装研究更是缺少相关资料,而异质结结构所产生的二维电子气信号传导层对封装应力的响应与传统体材料并不一致.

本文通过不断优化工艺得到性能优异的 Ga<sub>N</sub>基异质结霍尔传感器,采用 UV 胶、环氧树脂、硅橡胶 3 种不同材料封装传感器.为了考量 3 种封装材料对霍尔传感器的影响,使用 Sentaurus TCAD 和 COMSOL 软件仿真研究了不同材料封装对 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>霍尔传感器内部以及外部键合线的性能影响,并与实验结果对比验证,分析得出了 3 种不同材料封装对 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>霍尔传感器性能的具体影响,得到了性能最优的封装材料.用此封装材料封装后的传感器可以稳定应用在高温的极端环境中.

## 2 Ga<sub>N</sub>基霍尔传感器制备与封装

### 2.1 Ga<sub>N</sub>基霍尔传感器制备

本文使用大面积 Si 衬底 Ga<sub>N</sub>技术,在 6 英寸的 P 型 Si(111)衬底上利用 MOCVD (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition) 生长 Ga<sub>N</sub>厚膜,厚度为 25 nm、Al 组分为 0.25 的 Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>N 势垒层和厚度为 60 nm 的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>钝化层.在 AlGa<sub>N</sub>和 Ga<sub>N</sub>界面处生长 1.0 nm 的 AlN 插入层以增加两层之间的平整度及增加二维电子气(two-dimensional Electron Gas, 2DEG)的浓度和迁移率.本文使用的外延片二维电子气浓度可达  $5.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ,迁移率可以达到  $2\,000 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ .器件制作的第一步完成台面隔离,将器件形状曝光显影后通过电感耦合等离子体(Inductive Coupled Plasma, ICP)刻蚀设备进行刻蚀,保留本工作设计的十字形器件结构,形成器件隔离,防止漏电.第二步将电极处的 AlGa<sub>N</sub>利用 ICP 过刻

蚀,使电极可以直接接触到沟道中的二维电子气,沉积金属时可减小接触电阻. 最后一步制作欧姆接触电极,使用负性光刻胶,将欧姆电极 Ti/Al 蒸镀在第三步刻蚀出的凹槽及向外延伸的部分上,并进行 540 °C 退火.

图 1 所示为霍尔传感器的三维结构示意图、工艺完

成后的 6 英寸晶圆照片、霍尔传感器显微镜照片,以及欧姆电极处的扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)图. 可以看出,结构尺寸与工艺设计相符,欧姆电极刻蚀处有一定倾角,Ti/Al 金属与二维电子气相接触.

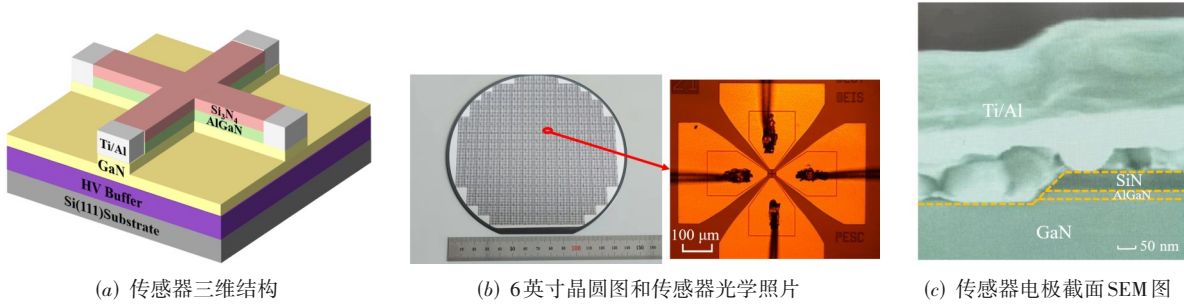


图 1 AlGaIn/GaN 异质结霍尔传感器结构示意图

### 2.2 霍尔传感器封装

为了使霍尔传感器工作时保持稳定,需对传感器进行封装. 首先将晶圆上制作出来的霍尔传感器进行切割,将单颗传感器切割成芯粒. 通过引线键合将传感器的电极用金线连接到 PCB 板的焊盘上,从而连接到外部引脚,最后采用 3 种封装胶将传感器封装在耐高温 PCB 板上<sup>[18]</sup>. 为保证封装前的传感器性能一致,测试了 3 个未封装的传感器的输出特性,结果如图 2 所示. 由图可知,3 个结构一致的霍尔传感器的输出特性几乎完全一致,全量程范围最大差值小于 0.5%. 3 种封装材料分别选用 UV 胶、环氧树脂、硅橡胶,封装胶的相关参数如表 1 所示,封装后的照片如图 3 所示.

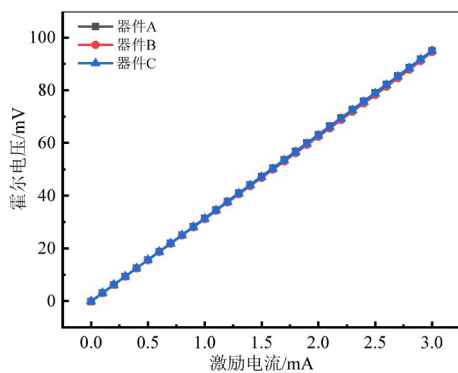


图 2 未封装传感器电流电压特性曲线

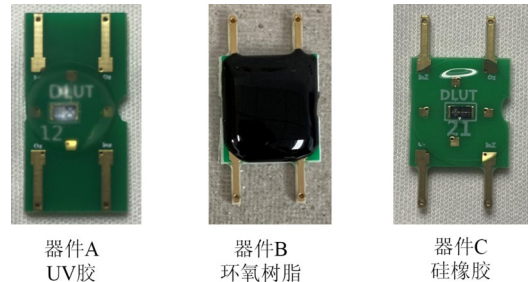


图 3 使用不同封装材料封装后的霍尔传感器

表 1 封装材料物理参数

物理参数	单位	UV 胶	环氧树脂	硅橡胶
导热系数 $k$	W/(m·K)	0.20	0.44	0.26
密度 $\rho$	kg/m <sup>3</sup>	1 600	1 673	1 270
杨氏模量 $E$	Pa	$3 \times 10^9$	$4 \times 10^9$	$1 \times 10^7$
泊松比 $\mu$	—	0.38	0.32	0.10
膨胀系数 $\alpha$	1/K	$1 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$	$2.7 \times 10^{-4}$
相对介电常数 $\epsilon$	—	4.0	3.5	3.0

注:表中物理参数均为常温下的参数.

情况,并且已将仿真参数根据传感器实验数据进行校正,仿真结果与实验结果一致. 图 4 所示为霍尔传感器的仿真结构.

COMSOL 软件广泛地应用在热应力及机械应力对

## 3 仿真建模与结果分析

### 3.1 Sentaurus TCAD 及 COMSOL 建模

Sentaurus TCAD 是 Synopsys 公司开发的半导体器件领域著名的仿真软件,在半导体工艺及器件模拟中具有较高的准确性. 本文采用 Sentaurus TCAD 仿真 GaN 霍尔传感器随应力变化时传感器内部的性能变化

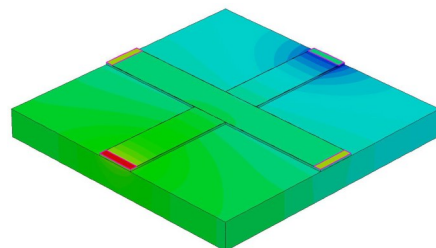


图 4 Sentaurus TCAD 三维仿真结构

半导体工作影响的仿真中<sup>[19,20]</sup>. 本文采用COMSOL中电流-电压模型、固体力学模型、传热模型等,以及多耦合物理场中电热耦合场、电磁热模型、热膨胀模型等模型仿真不同封装材料在高温情况下对GaN基霍尔传感器器件以及外部键合线的影响规律.

图5所示为本文构建的传感器封装结构在550 K温度热源下硅橡胶封装时的温度分布情况,其中封装部分为了使内部结构清晰可见,只展示了外围3个面的温度分布情况. 为了简化结构分析以及高效的计算,将4根相同的键合线简化为1根并进行仿真分析,封装材料的参数使用表1中的参数,GaN及金线使用如表2所

示的参数.

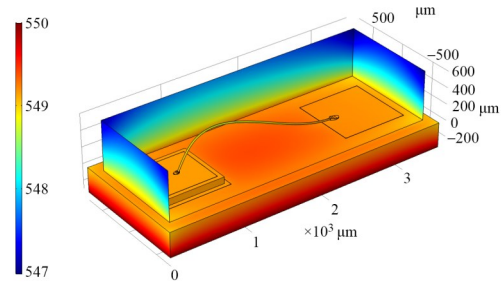


图5 550 K热源下GaN霍尔传感器温度分布

表2 GaN及金线相应物理参数

物理参数	单位	GaN	金线
相对介电常数 $\epsilon$	—	8.9	—
导热系数 $k$	W/(m·K)	130	317
杨氏模量 $E$	Pa	$2.1 \times 10^{11}$	$7.0 \times 10^{10}$
泊松比 $\mu$	—	0.17	0.44
膨胀系数 $\alpha$	1/K	$5.6 \times 10^{-6}$	$1.42 \times 10^{-5}$

### 3.2 应力对GaN基霍尔传感器内部二维电子气的影响研究

由于GaN的晶体结构为纤锌矿结构(闪锌矿结构热力学稳定性较低,本文不做讨论),这种结构本身没有中心对称性,从而导致每个晶胞的正负电荷中心不重合,并因此产生很强的内建电场,这种现象称为自发极化效应. AlGaN同样也有相似的自发极化效应. 在AlGaN/GaN异质结中,除了这两种材料本身的自发极化效应,还有因两种材料界面接触时晶格常数和极化强度等参数存在差异而导致的晶格失配应变,这会对晶格产生应力作用,形成电偶极矩,偶极矩互相积累会产生一个极大的内建电场,这种现象就是压电极化效应. 上述两种极化效应产生的极化电荷吸引电子积累在GaN表面,形成电子势阱,从而产生了二维电子气,这种二维电子气是GaN基霍尔传感器拥有高迁移率和稳定性的基础,而外部对GaN基材料施加的应力会大大影响晶格失配应变,影响AlGaN/GaN异质结界面所产生的二维电子气的分布和浓度的大小<sup>[21-23]</sup>,二维电子气浓度的计算式如下:

$$n = \frac{\sigma_{p-\text{AlGaN/GaN}}}{e} - \frac{\epsilon_0 \epsilon(x)}{de^2} [e\phi_s + \Delta E_F - \Delta E_C(x)] + \frac{N_D(d-d_i)^2}{2d} \quad (1)$$

其中, $d$ 为AlGaN势垒层厚度; $\epsilon(x)$ 为AlGaN相对介电常数; $N_D$ 为掺杂层掺杂浓度; $d_i$ 为未掺杂层厚度; $e\phi_s$ 为AlGaN表面势; $x$ 为AlGaN的Al组分大小; $e$ 为基本电荷电量; $\sigma_{p-\text{AlGaN/GaN}}$ 为AlGaN/GaN界面的极化面电荷;

$\Delta E_F$ 为GaN侧量子阱底部导带能量与费米能级的距离;AlGaN/GaN界面导带带阶 $\Delta E_C(x) = 0.7\Delta E_g$ , $\Delta E_g$ 为AlGaN和GaN的禁带宽度之差. AlGaN/GaN异质结界面的极化面电荷 $\sigma_{p-\text{AlGaN/GaN}}$ 由压电极化和自发极化强度决定,即

$$\sigma_{p-\text{AlGaN/GaN}} = |P_{\text{PE}}^{\text{AlGaN/GaN}} + P_{\text{SP}}^{\text{AlGaN}} - P_{\text{SP}}^{\text{GaN}}| \quad (2)$$

其中, $P_{\text{PE}}^{\text{AlGaN/GaN}}$ 为AlGaN/GaN异质结界面压电极化强度; $P_{\text{SP}}^{\text{AlGaN}}$ 为AlGaN的自发极化强度; $P_{\text{SP}}^{\text{GaN}}$ 为GaN的自发极化强度. 外部应力导致的AlGaN晶格应变 $a$ 和应力弛豫度relaxation的变化主要影响界面处的压电极化强度,即

$$P_{\text{PE}}^{\text{AlGaN/GaN}} = (1-R) \times 2 \times \frac{a-a_0}{a_0} \left( e_{31} - e_{33} \frac{C_{13}}{C_{33}} \right) \quad (3)$$

其中, $R$ 为AlGaN层应力弛豫度relaxation; $a$ 和 $a_0$ 为AlGaN的应变晶格常数和本征晶格常数; $e_{31}$ 和 $e_{33}$ 、 $C_{13}$ 和 $C_{33}$ 分别为AlGaN材料的压电常数和弹性常数. 可见晶格应变 $a$ 和应变弛豫度relaxation对压电极化强度有很大影响,从而极大改变界面极化电荷和二维电子气浓度,具体浓度变化范围通过Sentaurus TCAD的仿真结果可以得出,结果如图6所示.

### 3.3 封装对GaN基霍尔传感器应力分布及大小的影响研究

为了研究3种不同封装材料在常温及高温情况下对传感器施加应力的情况,采用COMSOL软件仿真了3种不同材料封装后在常温及550 K的温度下传感器内部的应力分布情况,结果如图7所示.

从GaN内部应力的整体大小可以看出环氧树脂封

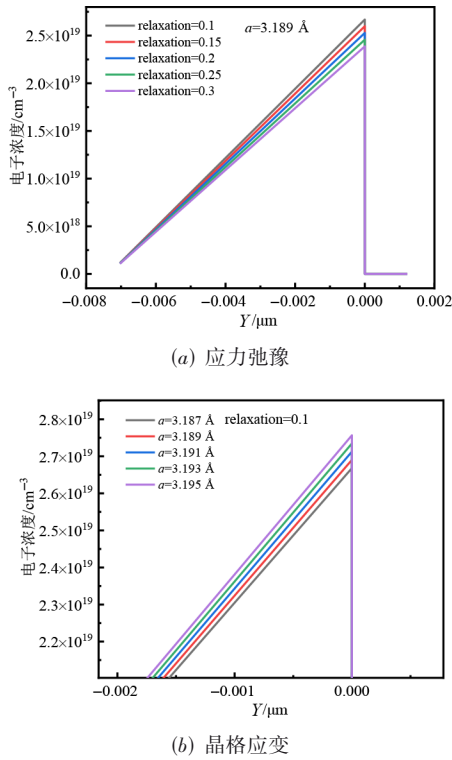


图 6 二维电子气浓度与应力弛豫和晶格应变的关系

装的应力最大,且随温度升高增长的也较快,其次是UV胶,硅橡胶内部应力最小,随温度升高变化也最小,这与几种材料的热膨胀系数大小有关,而应力变化较小相应的内部电子浓度变化也就较小,由文献[24]可知,霍尔传感器在电流激励时灵敏度主要取决于内部

电子浓度的变化,所以硅橡胶封装传感器的灵敏度及温漂系数是最优的.从应力分布情况可以看出,环氧树脂封装的传感器内部应力分布并不均匀,中心沿x轴方向应力较高,且沿y轴方向呈现非对称性,这与封装材料本身的杨氏模量与泊松比等参量相关.而霍尔传感器的失调电压大小主要受传感器结构及参数的非对称性影响<sup>[25]</sup>,应力分布不均会导致传感器内部的电子浓度分布的差异,也就会使失调电压增大.UV胶封装时中心应力也有较高的凸起部分,随温度升高内部应力分布变化较大,由应力分布较高转为应力分布较低,这同样会使传感器性能退化.硅橡胶封装传感器中心部分应力分布均匀,且随温度升高并无明显的非均匀变化,所以在硅橡胶封装下只要不将器件设计在GaN材料的边缘部分便可尽量减小应力变化带来的影响.

除了传感器内部的应力,外部的键合线由于较大的应力引起的开裂和翘起等现象,也是传感器失效的主要原因之一.本文利用COMSOL软件同时仿真了外部键合金线在不同封装及不同温度下应力分布及变化情况.不同封装胶下金线在550 K温度下应力大小及分布情况如图8(a)所示,在传感器一侧的键合处由于金线弯曲量较大所以承受的应力也是整段键合线中最高的一部分,传感器也最易在此处产生失效.图8(b)所示为不同封装胶封装时传感器一侧键合处的应力随温度变化的情况,环氧树脂封装时应力随温度升高幅度明显高于其他两种封装胶,应力增长较快,这也就更容易在升温时产生失效的现象,而其他两种封装应力增幅较低,其中UV胶的键合金线应力高于硅橡胶.

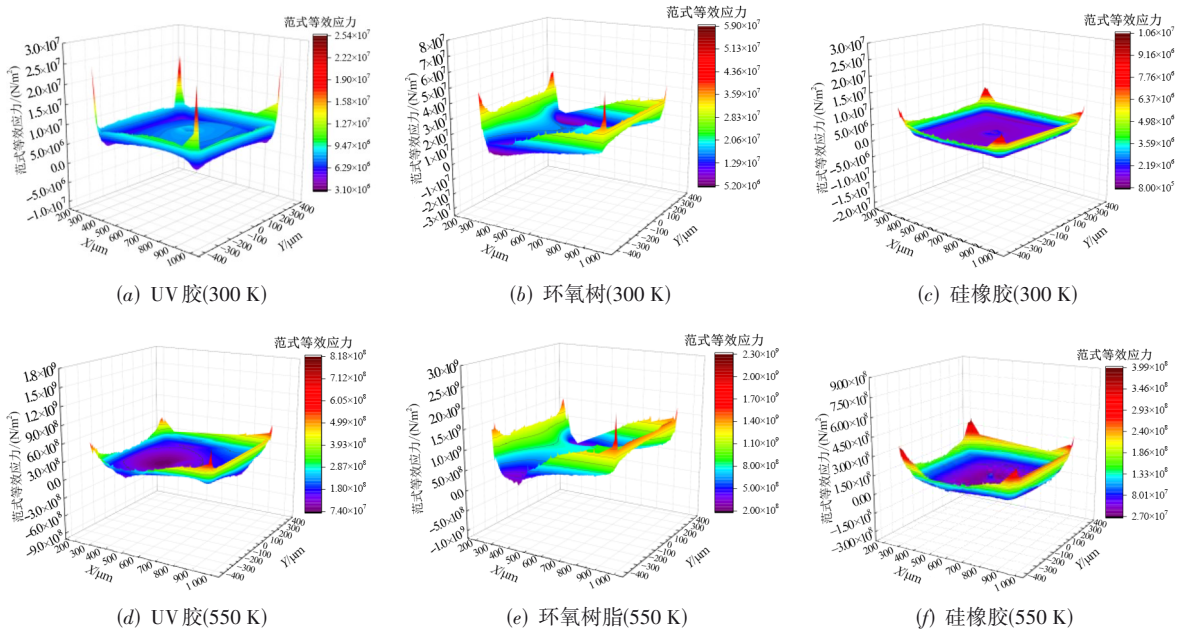
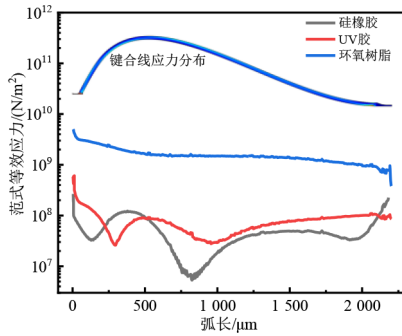
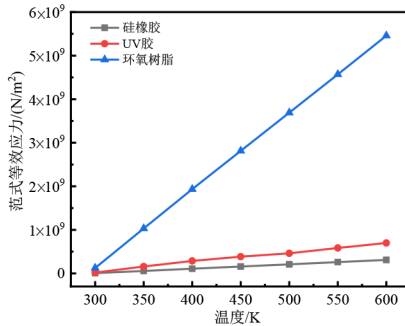


图 7 300 K 温度下 UV 胶、环氧树脂、硅橡胶和 550 K 温度下 UV 胶、环氧树脂、硅橡胶封装时 GaN 内部截面应力分布



(a) 550 K 温度下不同封装键合金线等效应力分布图



(b) 传感器键合处等效应力随温度变化情况

图8 550 K 温度下不同封装键合金线等效应力分布图及传感器键合处等效应力随温度变化情况

## 4 实验结果与分析

上一节中利用 Sentaurus TCAD 和 COMSOL 仿真软件对传感器不同封装的具体影响进行了仿真分析,本节将根据具体实验结果与仿真分析进行对照与讨论。

### 4.1 测试方法

本文所用测试系统包括:能产生 0~1.0 T 磁场强度的电磁铁,用来给电磁铁供电的直流稳压电源,真空泵,高温恒温器,可以检测电磁铁磁场大小的高灵敏度高斯计,用来给霍尔传感器提供电流的源表,检测霍尔电压的万用表,控制传感器温度的控温仪,以及相应的控制软件,测试系统示意图如图 9 所示。通过控制电

铁产生的磁场,在真空环境中控温仪控制杜瓦瓶升高温度,并实时控制电流输入信号检测输出电压信号。将封装好的霍尔传感器通过导线连接外部的源表和万用表,并进行测试。

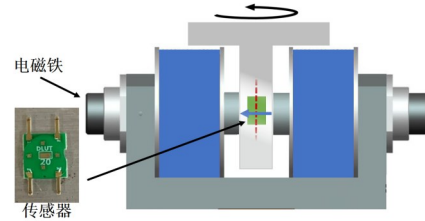


图9 测试系统示意图

### 4.2 失调电压

失调电压为传感器在外部没有磁场的环境下测得的电压输出,之所以在不外加磁场时仍有信号输出,是器件制作时对准误差导致结构不完全对称、材料不均匀、封装应力等情况引起的不等位电阻造成的<sup>[11]</sup>。本文对 3 种材料封装的传感器分别测试了封装前后的失调电压大小,以确定封装胶对传感器失调电压的影响,结果如图 10 所示。可以看出,AlGaIn/GaN 霍尔传感器本身的失调电压较小,0~3.0 mA 输入电流范围内几个传感器失调电压均小于 500  $\mu\text{V}$ ,在较为常用的 1.0 mA 输入电流下失调电压最小仅为 115  $\mu\text{V}$ 。而从不同封装产生的影响中可以看出,UV 胶和环氧树脂对失调电压影响较大,硅橡胶对失调电压影响较小,最大影响也仅使失调电压变化了 22  $\mu\text{V}$ 。说明封装导致的应力分布不均匀,这与上一节中 UV 胶和环氧树脂有更大的应力不对称的仿真结果一致。

### 4.3 霍尔电压与灵敏度

霍尔电压与激励电流和磁场强度的关系如下:

$$V_H = \frac{I_{\text{bias}} B}{net} \quad (4)$$

其中,  $I_{\text{bias}}$  为激励电流;  $B$  为垂直于传感器表面方向的磁感应强度;  $n$  为载流子浓度;  $e$  为电子电荷量;  $t$  为半导体有源区的厚度。

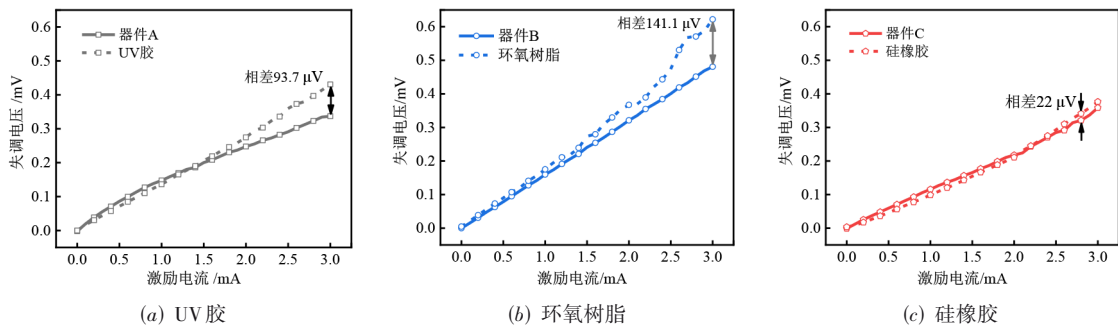


图10 UV 胶、环氧树脂、硅橡胶封装前后传感器失调电压大小

封装前后的霍尔传感器的输出特性在室温条件下的测试结果如图 11 所示,测试了传感器输入电流与输出霍尔电压的  $I$ - $V$  特性曲线和磁场强度与输出霍尔电压的  $B$ - $V$  特性曲线,结果均已减去失调电压的影响.可以看出,不同封装在封装前后输出特性几乎一致,测试范围内最大变化也在 0.6% 以内,在较大磁场时这几种封装对输出性能的影响均较小,这与常温时封装对传感器本身影响较小有关.传感器本身在 0 mA 到 3.0 mA 的宽激励电流范围以及 0 mT~1.0 T 的宽磁场测试范围内,霍尔电压与激励电流和磁场强度之间线性度均优于 0.3%.

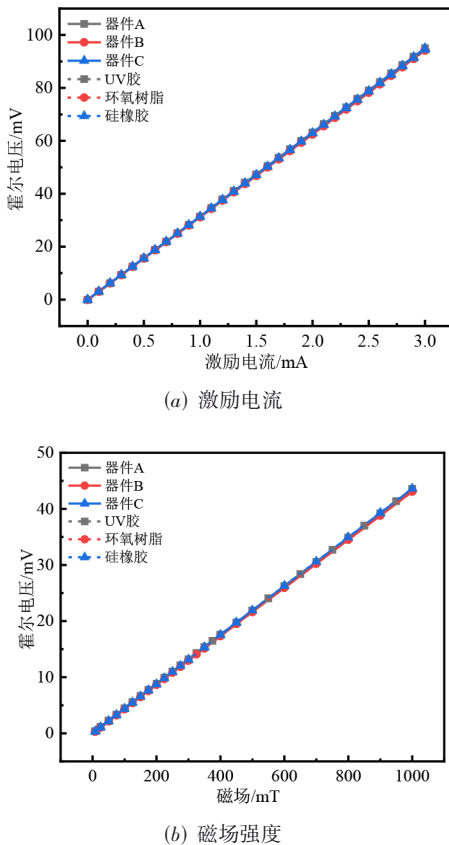


图 11 霍尔电压与激励电流和磁场强度的关系

灵敏度是衡量霍尔传感器性能的一个主要指标,灵敏度与磁场强度、激励电流和霍尔电压相关,反映了传感器对磁场的敏感程度<sup>[25]</sup>,计算式如下:

$$S_1 = \left| \frac{1}{I_{\text{bias}}} \cdot \frac{V_H}{B_{\perp}} \right| \quad (5)$$

其中,  $S_1$  的单位为 V/AT.

灵敏度随激励电流和外加磁场的变化关系如图 12 所示.可以看出,不同封装前后灵敏度基本一致,稳定在 62.5 V/AT,高于已报道的 GaN 基霍尔传感器<sup>[26,27]</sup>,说明本工作研制的传感器测试性能稳定且灵敏度较高,

而这几种封装对灵敏度影响均较小.

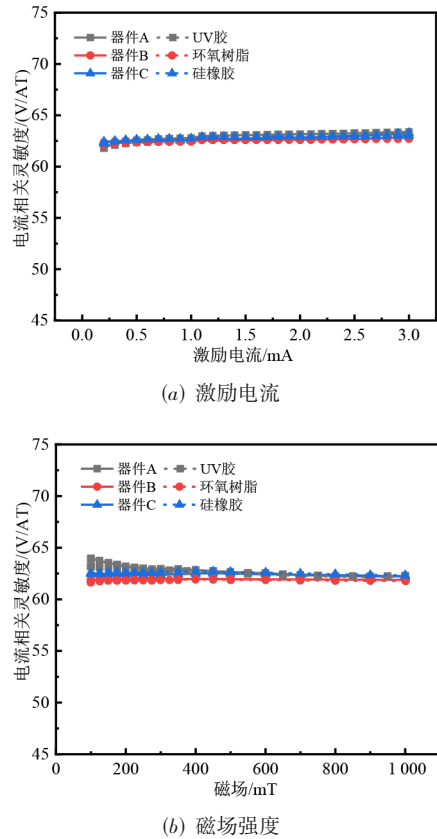


图 12 灵敏度与激励电流和磁场强度的关系

#### 4.4 温度稳定性

能稳定工作在较高温度是 GaN 异质结霍尔传感器相较于传统 Si 基、GaAs 基等窄禁带霍尔传感器的优势所在.因此,能使传感器稳定工作在高温的封装尤为重要.本文测试了不同封装材料封装后传感器灵敏度随温度变化的情况.温漂系数是反映传感器在高温环境中工作时性能稳定性的重要参量,其计算式如下:

$$TC = \frac{1}{S_1} \cdot \frac{\partial S_1}{\partial T} \quad (6)$$

其中,  $T$  表示温度,单位为 K.

不同封装高温性能测试结果如图 13 所示.本文测试了霍尔传感器 300~550 K 温度范围内的灵敏度变化情况,其中环氧树脂封装传感器在高于 425 K 的温度后霍尔电压急剧下降至 0 V,传感器失效,这与上一节中仿真结果相匹配.说明在 425 K 温度下由环氧树脂封装导致的高应力使键合线的连接失效,从而使传感器无法工作.其他两种封装均测试了温度到 550 K 时的性能.其中硅橡胶温度性能最好,温漂系数仅有 -120.9 ppm/K,展示了 GaN 基霍尔传感器优异的高温性能,这也与上一节仿真结果相对应,UV 胶在升温后对

传感器的影响要高于硅橡胶. 此封装测试工作温度范围在大于传统窄禁带 Si 或 GaAs 材料霍尔传感器的同时, 温漂系数也较小<sup>[28-30]</sup>, 也同样优于已报道的同 GaN 基异质结霍尔传感器<sup>[10,13,14]</sup>, 本文提出的传感器可以在 550 K 高温下稳定工作.

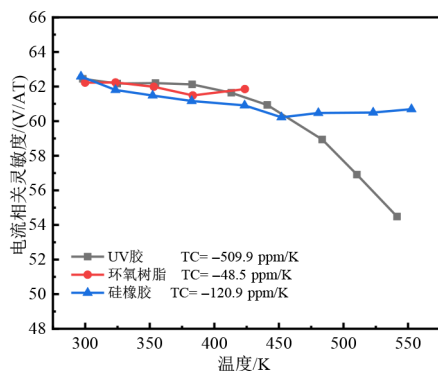


图13 灵敏度与温度关系

综合仿真与实验测试结果, 可以得出硅橡胶对传感器整体性能的影响均较小, 且可以稳定工作在高温环境中, 是封装 GaN 基霍尔传感器的理想材料.

## 5 结论

本文提出了一种 AlGaIn/GaN 异质结十字形水平霍尔传感器制作方法, 选择了 UV 胶、环氧树脂和硅橡胶 3 种不同封装材料对传感器进行封装并对封装后的传感器进行仿真与实验结果的对比. 通过 Sentaurus TCAD 和 COMSOL 两款软件仿真 3 种封装胶封装后对传感器内部及外部键合线的应力影响, 得出硅橡胶对传感器内部及外部键合线的影响均最小, 并通过实验测试了霍尔传感器的失调电压、输出特性、高温特性. 环氧树脂封装时在 425 K 温度下较高的应力会使传感器失效, 实验结果验证了仿真分析结果. 硅橡胶封装前后的传感器失调电压在 0~3.0 mA 范围内最大仅变化了 22  $\mu$ V, 且可以使传感器以 -120.9 ppm/K 的温漂系数工作在 300~550 K 的温度范围内, 优于其他报道的传统材料及 GaN 材料霍尔传感器. 在 1.0 mA 电流时, 传感器的失调电压最小仅有 115  $\mu$ V, 在 0~3.0 mA 激励电流及 0~1.0 T 磁场强度范围内线性度优于 0.3%, 灵敏度为 62.5 V/AT. 本文通过仿真和实验优选出的硅橡胶封装可以最大发挥 GaN 霍尔传感器优异的性能, 使霍尔传感器可在高温环境中稳定工作. 后续工作可以设计降低霍尔传感器失调电压的电路, 进一步提升传感器性能.

## 参考文献

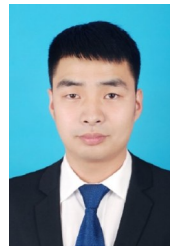
[1] DIMITROV K. 3-D Silicon Hall sensor for use in magnetic-based navigation systems for endovascular interven-

tions[J]. *Measurement*, 2007, 40(9/10): 816-822.

- [2] NGUYEN H Q, DINH T, MOGHADAM H A, et al. Al-GaN/GaN 2-D electron gas for highly sensitive and high-temperature current sensing[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2021, 68(4): 1495-1500.
- [3] FAN H, WANG J M, FENG Q Y, et al. Detection techniques of biological and chemical Hall sensors[J]. *RSC Advances*, 2021, 11(13): 7257-7270.
- [4] 曹印妮, 张东来, 徐殿国. 三维漏磁场的钢丝绳局部损伤定量分析算法研究[J]. *电子学报*, 2007, 35(6): 1170-1173. CAO Y N, ZHANG D L, XU D G. Study on algorithms of wire rope localized flaw quantitative analysis based on three-dimensional magnetic flux leakage[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(6): 1170-1173. (in Chinese)
- [5] ALPERT H S, CHAPIN C A, DOWLING K M, et al. Sensitivity of 2DEG-based Hall-effect sensors at high temperatures[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(2): 025003.
- [6] HUANG H L, ZHANG H, CAO Y Q, et al. High-temperature three-dimensional GaN-based hall sensors for magnetic field detection[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2021, 54(7): 075003.
- [7] KOIDE S, TAKAHASHI H, ABDERRAHMANE A, et al. High temperature hall sensors using AlGaIn/GaN HEMT structures[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2012, 352: 012009.
- [8] ASGARI A, BABANEJAD S, FARAONE L. Electron mobility, Hall scattering factor, and sheet conductivity in Al-GaN/AlN/GaN heterostructures[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(11): 113713.
- [9] 郝跃, 张金凤, 张进成. 氮化物宽禁带半导体材料与电子器件[M]. 北京: 科学出版社, 2013. HAO Y, ZHANG J F, ZHANG J C. Nitride Wide Band Gap Semiconductor Materials and Electronic Devices[M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)
- [10] WHITE T P, SHETTY S, WARE M E, et al. AlGaIn/GaN micro-hall effect devices for simultaneous current and temperature measurements from line currents[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(7): 2944-2951.
- [11] ALPERT H S, DOWLING K M, CHAPIN C A, et al. Effect of geometry on sensitivity and offset of AlGaIn/GaN and InAlN/GaN Hall-effect sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(10): 3640-3646.
- [12] 曹亚庆, 黄火林, 孙仲豪, 等. 基于宽禁带 GaN 基异质结结构的垂直型高温霍尔传感器[J]. *物理学报*, 2019, 68(15): 346-355.

- CAO Y Q, HUANG H L, SUN Z H, et al. Demonstration of wide-bandgap GaN-based heterojunction vertical Hall sensors for high-temperature magnetic field detection[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(15): 346-355. (in Chinese)
- [13] KUMAR S, MURALIDHARAN R, NARAYANAN G. Hall-effect sensors based on AlGaIn/GaN heterojunctions on Si substrates for a wide temperature range[J]. *IET Circuits, Devices & Systems*, 2021, 15(8): 772-786.
- [14] ZHANG H, HUANG H L, MA K M, et al. AlGaIn/GaN magnetic sensors featuring heterojunction 2DEG channel[J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(11): 115114.
- [15] FISCHER S, FELLNER T, WILDE J, et al. Analyzing parameters influencing stress and drift in moulded hall sensors[C]//2006 1st Electronic Systemintegration Technology Conference. Piscataway: IEEE, 2006: 1378-1385.
- [16] VAN DER MEER J, RIEDIJK F, VAN KAMPEN E, et al. Low-cost epoxy packaging of CMOS Hall-effect compasses[C]//2005 IEEE SENSORS. Piscataway: IEEE, 2006: 1597638.
- [17] MANIC D, PETR J, POPOVIC R S. Temperature cross-sensitivity of Hall plate in submicron CMOS technology[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2000, 85(1/2/3): 244-248.
- [18] HOLLSTEIN K, YANG X, WEIDE-ZAAGE K. Thermal analysis of the design parameters of a QFN package soldered on a PCB using a simulation approach[J]. *Microelectronics Reliability*, 2021, 120: 114118.
- [19] HUANG H Y, QIAN Z H, YANG J S. Mechanical manipulation of electrical behaviors of piezoelectric semiconductor nanofibers by time-dependent stresses[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2020, 33(5): 579-585.
- [20] LI N, QIAN Z H, YANG J S. Effects of edge and interior stresses on electrical behaviors of piezoelectric semiconductor films[J]. *Ferroelectrics*, 2021, 571(1): 96-108.
- [21] TONG W L, TANG W, ZHANG Z J. Electron transport in AlGaIn/GaN HEMTs using a strain model[J]. *Computational Materials Science*, 2018, 143: 391-397.
- [22] AZIZE M, PALACIOS T. Effect of substrate-induced strain in the transport properties of AlGaIn/GaN heterostructures[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(2): 023707.
- [23] 孔月婵, 郑有焘, 周春红, 等. AlGaIn/GaN 异质结构中极化与势垒层掺杂对二维电子气的影响[J]. *物理学报*, 2004, 53(7): 2320-2324.
- KONG Y C, ZHENG Y L, ZHOU C H, et al. Influence of polarizations and doping in AlGaIn barrier on the two-dimensional electron-gas in AlGaIn/GaN heterostructure[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(7): 2320-2324. (in Chinese)
- [24] MA K M, HUANG H L, DING N N, et al. Demonstration of high-performance GaN-based hall sensors on Si substrate by simulation and experiment verification[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2022, 69(12): 7019-7024.
- [25] POPOVIC R S. *Hall Effect Devices*[M]. 2nd ed. London: IOP Publishing Ltd, 2004.
- [26] CONSEJO C, CONTRERAS S, KONCZEWICZ L, et al. High temperature electrical investigations of (Al, Ga)N/GaN heterostructures-Hall sensor applications[J]. *Physica Status Solidi (c)*, 2005, 2(4): 1438-1443.
- [27] LU H, SANDVIK P, VERTIATCHIKH A, et al. High temperature Hall effect sensors based on AlGaIn/GaN heterojunctions[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 99(11): 114510.
- [28] ZHAO X F, BAI Y J, DENG Q, et al. Research of the monolithic integrated 3-D magnetic field sensor based on MEMS technology[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(18): 5849-5856.
- [29] BEHET M, BEKAERT J, DE BOECK J, et al. InAs/Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>Sb quantum well Hall effect sensors[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2000, 81(1/2/3): 13-17.
- [30] TODARO M T, SILEO L, EPIFANI G, et al. A fully integrated GaAs-based three-axis Hall magnetic sensor exploiting self-positioned strain released structures[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2010, 20(10): 105013.

#### 作者简介



马凯鸣 男, 1996年4月出生于吉林省延吉市. 现为大连理工大学光电工程与仪器科学学院博士. 主要研究方向为第三代半导体磁传感器.

E-mail: makaiming1219@163.com



黄火林 男, 1982年9月出生于福建省福州市. 现为大连理工大学光电工程与仪器科学学院教授、博士生导师. 获中国循环经济协会科学技术奖等奖项. 主要研究方向为宽禁带电子器件制造与仪器集成技术. 中国电子学会会员 编号: E190029651S.

E-mail: hlhuang@dlut.edu.cn