

霍尔电流传感器制备工艺综述

王 相, 王静怡, 张 宇, 王梓畅

威海精讯畅通电子科技有限公司, 山东 威海

收稿日期: 2025年3月26日; 录用日期: 2025年5月12日; 发布日期: 2025年5月21日

摘 要

霍尔电流传感器作为非接触式电流测量的核心器件, 其性能高度依赖于材料生长与微纳加工工艺。本文系统综述了分子束外延(MBE)、金属有机化学气相沉积(MOCVD)、化学气相沉积(CVD)、聚焦离子束(FIB)及聚焦电子束诱导沉积(FEBID)四种关键制备工艺的技术原理、发展历程与应用效果。通过对比分析各工艺的优劣势, 提出未来研究方向应聚焦于工艺集成化、成本控制及新型材料体系的开发, 以满足工业界对高精度、高可靠性传感器的需求。

关键词

霍尔电流传感器, 分子束外延, 化学气相沉积, 聚焦离子束, 微纳加工

A Review of the Preparation Process of Hall Current Sensors

Xiang Wang, Jingyi Wang, Yu Zhang, Zichang Wang

Weihai Jingxun Changtong Electronic Technology Co., Ltd., Weihai Shandong

Received: Mar. 26th, 2025; accepted: May 12th, 2025; published: May 21st, 2025

Abstract

As a core device for non-contact current measurement, the performance of Hall current sensors is highly dependent on material growth and micro-nano fabrication processes. This paper systematically reviews the technical principles, development history, and application outcomes of four key fabrication processes: Molecular Beam Epitaxy (MBE), Metal-Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD), Chemical Vapor Deposition (CVD), Focused Ion Beam (FIB), and Focused Electron Beam Induced Deposition (FEBID). Through a comparative analysis of the advantages and disadvantages of each process, future research directions are proposed to focus on process integration, cost control, and the development of novel material systems to meet the industrial demand for high-precision and high-reliability sensors.

Keywords

Hall Current Sensor, Molecular Beam Epitaxy, Chemical Vapor Deposition, Focused Ion Beam, Micro-Nano Fabrication

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

霍尔电流传感器凭借非接触测量、宽频响应和高精度等优势，在新能源发电、电动汽车及工业自动化等领域广泛应用。随着器件小型化与集成化需求的提升，传统工艺面临灵敏度、温度稳定性及成本的多重挑战。以 MBE、MOCVD 为代表的薄膜生长技术，结合 FIB/FEBID 等微纳加工手段，为传感器性能突破提供了新路径。本文从工艺原理出发，系统梳理其技术演进与产业应用，以期为高性能传感器开发提供理论参考[1] [2]。

2. 研究背景与现状

在电力电子技术迅猛发展的背景下，新能源发电、电动汽车等领域对电流测量的精准性、可靠性和实时性需求迫切，霍尔电流传感器因自身优势成为关键技术。同时，电子器件小型化集成化趋势促使传感器减小尺寸、提高集成度，而新材料和新技术的涌现，如纳米材料和微纳加工技术，为其性能提升带来机遇。当前，分子束外延(MBE)；金属有机化学气相沉积(MOCVD)；化学气相沉积(CVD)；聚焦离子束(FIB)和聚焦电子束诱导沉积(FEBID)几种霍尔电流传感器制备工艺，下面对以上几种制备工艺进行综合叙述[1] [3]。

3. 制备工艺特点与分析

3.1. 分子束外延(MBE)

分子束外延(MBE)是一种物理气相沉积技术，其过程需在超高真空环境中进行，该环境的真空度约处于 $10^{-8}\sim 10^{-11}$ Pa 范围。在如此极端的真空条件下，能最大程度减少杂质的存在，为精确的材料生长提供理想环境。

MBE 技术始于 20 世纪 60 年代，在精确控制材料生长方面展现出独特优势，早期用于 GaAs 单晶薄膜生长；在 20 世纪 70 年代末至 80 年代初，开始尝试将 MBE 技术应用于霍尔电流传感器领域。当时，传统方法制备的霍尔电流传感器在性能上遇到灵敏度和精度提升困难瓶颈。得益于 MBE 技术因其能够精确控制薄膜生长的原子层级特性，探索不同生长条件对材料电学性能的影响。同时，研究如何优化衬底处理工艺，以提高外延层与衬底之间的晶格匹配度，减少缺陷的产生。在制备过程中，首先将经过严格清洗和处理的衬底放入 MBE 设备构成半导体材料的原子束或分子束喷射到衬底表面，按照预设的生长模式进行外延生长。通过精确控制分子束的流量、束流时间以及衬底温度等参数，实现对薄膜生长的精确控制。

进入 20 世纪 90 年代，随着电子技术的飞速发展，对霍尔电流传感器的性能提出了更高要求，如更高的灵敏度、更宽的测量范围以及更好的温度稳定性。此时，MBE 技术也在不断发展，衍生出气态源分

子束外延(GSMBE)、金属有机物分子束外延(MOMBE)等多种变体技术。

21 世纪以来, MBE 技术的多种变体极大地拓展了可用于霍尔电流传感器的材料体系, 使其不再局限于传统的半导体材料。其中, AlN/GaN 量子阱结构在霍尔传感器中的应用成为研究热点。AlN/GaN 异质结由于其独特的能带结构, 能够形成高迁移率的二维电子气(2DEG), 这为制备高性能霍尔电流传感器提供了理想的材料基础。利用 MBE 技术的低温沉积特性, 可以有效抑制杂质扩散, 保证异质结界面的高质量和稳定性。通过栅极电压调控二维电子气的浓度和分布, 能够显著提升霍尔电流传感器的灵敏度, 实验表明灵敏度可提升达 70%。在万物互联的时代背景下, 这种高性能的霍尔电流传感器具有重要的应用价值。在工业自动化领域, 可实现对电机电流的精确监测和控制, 提高生产效率和产品质量。

现代传感器微型化的浪潮下分子束外延(MBE)制备的霍尔电流传感器与微机电系统(MEMS)技术、集成电路技术深度融合, 开辟了全新的发展路径。借助 MBE 技术原子级别的精准控制能力, 能生长出高质量、低缺陷的半导体薄膜材料, 为霍尔电流传感器奠定了卓越的性能基础, 赋予其超高的灵敏度和稳定性。MEMS 技术则凭借其微纳加工的优势, 可将霍尔电流传感器的敏感元件尺寸大幅缩小, 实现微型化。在这个过程中, 利用光刻、蚀刻等 MEMS 工艺, 能精准制造出复杂的三维结构, 极大地提高了传感器的集成度, 降低了功耗。

虽说分子束外延(MBE)技术在霍尔电流传感器制造工艺里有不少优势, 可缺点也挺明显。首先, 设备成本高昂, 其包含多个高真空腔室、分子束源、监测系统等复杂组件, 一台中等规模的 MBE 设备采购成本通常在数百万美元以上, 远超化学气相沉积(CVD)等常见薄膜制备设备; 其次, 生产效率低下, MBE 技术生长速率每秒仅几个原子层, 在制备相同厚度半导体薄膜时, 所需时间可能是 CVD 的数倍甚至数十倍, 导致生产周期长, 无法满足大规模工业化生产对产量和效率的要求, 影响产品市场供应和成本控制。再者, 工艺复杂性高, MBE 工艺需在 10^{-8} 至 10^{-11} 帕的超高真空环境下进行, 维持该环境设备复杂、运行成本高, 且生长过程对分子束精确控制要求极高, 涉及多种元素精确配比和流量控制, 稍有偏差就会影响薄膜质量和传感器性能, 操作和维护难度极大, 需专业技术人员和复杂工艺流程保障。最后, 材料兼容性受限, MBE 技术生长薄膜时对衬底材料和生长材料的晶格匹配要求严格, 在霍尔电流传感器制造中常用的硅、砷化镓等半导体材料, 要实现高质量 MBE 生长, 寻找匹配衬底材料困难, 晶格失配过大易产生大量位错和缺陷, 影响薄膜电学性能和传感器灵敏度、稳定性等关键指标, 限制了材料选择和器件设计的灵活性[1][4]。

3.2. 化学气相沉积(CVD)与金属有机化学气相沉积(MOCVD)

化学气相沉积(CVD)和金属有机化学气相沉积(MOCVD)是两种薄膜沉积技术, 广泛应用于半导体制造、光学涂层、防护涂层等领域。CVD 通过将气态前驱体引入反应室并在加热的基底上发生化学反应, 生成固态薄膜, 适用于多种材料体系。MOCVD 则是 CVD 的一种特殊形式, 主要使用金属有机化合物作为前驱体, 特别适合于 III~V 族和 II~VI 族半导体材料的生长。

在 20 世纪 60 年代, 随着半导体技术的初步发展, 化学气相沉积(CVD)工艺开始崭露头角。当时, CVD 主要用于简单的半导体薄膜沉积, 如硅薄膜的制备。这一时期, 霍尔电流传感器的概念刚刚兴起, 早期的霍尔元件多采用锗或硅等传统半导体材料并使用分子束外延(MBE)工艺进行生产, 但由于分子束外延(MBE)技术生产成本高昂, 只能适合小批量定制化生产, 随着 CVD 技术的发展, 研究人员发现 CVD 技术不仅可以降低生产价格而且还可以更精确地控制薄膜的质量和厚度, 从而提高了霍尔元件的产量性能, 于是人们尝试利用 CVD 工艺制备基础的霍尔元件, 但由于工艺精度和材料质量的限制, 传感器的性能较差, 主要应用于一些对精度要求不高的工业电流监测领域, 如简单的电机电流检测。

到了 80 年代, CVD 工艺有了显著进步, 能够实现更精确的薄膜厚度控制并且随着 CVD 工艺的进步使用 III~V 族化合物半导体材料如砷化镓(GaAs)、磷化铟(InP)以及氮化镓(GaN)等新型半导体材料成为可能, 这非常适合用于制造高性能的霍尔电流传感器这使得霍尔电流传感器的性能得到大幅提升, 开始应用于电子设备的电源管理, 用于监测和控制电流, 提高设备的稳定性和效率。

与此同时, 金属有机化学气相沉积(MOCVD)工艺开始发展。MOCVD 能够精确控制原子级别的材料生长, 这为开发微型化、集成化的霍尔传感器提供了可能。例如, 利用 MOCVD 可以在硅基板上直接生长高质量的氮化镓(GaN)或砷化镓(GaAs)层, 这种工艺原子级别的材料生长制备工艺特别适用于制备化合物半导体薄膜对于制备高效能的霍尔元件至关重要。在霍尔电流传感器制备中, MOCVD 制备的 GaAs 基霍尔元件展现出比传统硅基元件更好的性能, 如更高的灵敏度和更快的响应速度。这些高性能的霍尔电流传感器开始应用于汽车电子领域, 如汽车发动机的电子控制系统, 用于精确测量电流以优化燃油喷射和点火系统。

进入 21 世纪, CVD 和 MOCVD 工艺都达到了高度成熟的阶段。随着数位化革命的到来, 人们使用的电子设备不断小型化发展, CVD 在大规模集成电路制造中的应用势在破竹, 这使得霍尔电流传感器能够实现小型化和集成化, 广泛应用于消费电子设备, 例如在我们使用的手机中大展拳脚, 由于手机内部有众多电子元件, 需要精确的电流监测与控制, 以保障电池稳定供电、充电过程安全高效。CVD 工艺制备的霍尔电流传感器能够实现小型化与集成化, 完美契合手机内部空间紧凑的特点。通过实时监测电池电量与充电电流, 它能避免手机电池过充、过放, 延长电池使用寿命, 同时确保手机在各种运行状态下, 电源系统稳定运行, 维持手机整体性能稳定。从时间线看, 距离 CVD 工艺首次在手机中应用已过去二十余年, 这期间该工艺不断迭代, 助力手机性能持续升级。

与此同时 MOCVD 工艺则不断提升材料质量和生长效率, 制备出的霍尔电流传感器在航空航天、医疗设备等高精尖领域发挥重要作用。在航空航天中, 用于飞行器的电力系统监测, 确保飞行安全; 在医疗设备中, 除了用于核磁共振成像(MRI)设备的电流控制, 提高成像质量外, 还在一些高端医疗检测设备如基因测序仪的微电流检测环节发挥关键作用。基因测序仪需要精确控制和检测微小电流, 以实现生物分子的精准分析, MOCVD 工艺制备的霍尔电流传感器凭借其高灵敏度和高精度, 能够准确检测这些微弱电流信号, 为基因测序的准确性提供保障。此外, 在一些专业的放疗设备中, 精确的电流控制对于确保放射剂量的准确性至关重要, MOCVD 工艺制备的霍尔电流传感器可以实时监测和调控设备中的电流, 保证放疗过程安全有效地进行, 最大程度减少对患者正常组织的伤害。

随着技术的不断发展, CVD 和 MOCVD 工艺在霍尔电流传感器制备中的应用将继续拓展, 为更多领域带来高性能的电流检测解决方案。

尽管学气相沉积(CVD)和金属有机化学气相沉积(MOCVD)技术在霍尔电流传感器制造工艺里有不少优势, 但它们也存在一些局限性和挑战。CVD 工艺通常需要高温环境, 这可能会对温度敏感的基材造成损害, 并且设备复杂、运行成本高, 维护要求严格。此外, CVD 过程中的反应条件苛刻, 可能导致杂质掺入, 影响薄膜质量。MOCVD 虽然在生长高质量半导体薄膜方面表现出色, 但其使用的金属有机前驱体往往价格昂贵且具有一定的毒性, 增加了操作风险和处理成本。同时, MOCVD 工艺对于精确控制反应参数的要求较高, 任何偏差都可能导致薄膜成分不均匀或晶体缺陷增加。因此, 未来的研究应致力于克服这些缺点, 通过技术创新提高工艺的可控性、降低成本并减少环境影响, 以推动微电子和光电子领域的持续进步[1] [5] [6]。

3.3. 聚焦离子束(FIB)与聚焦电子束诱导沉积(FEBID)

聚焦离子束(FIB)和聚焦电子束诱导沉积(FEBID)是两种微纳加工技术, 广泛应用于材料科学、半导体

制造及纳米技术领域。FIB 利用高能离子束(通常为镓离子)对样品进行精确的刻蚀、沉积和成像,能够在纳米尺度上实现材料的去除和添加。FEBID 则通过高能电子束激活吸附在样品表面的金属有机前驱体气体,引发局部化学反应并沉积出所需的固态材料,特别适合于制备高度选择性和复杂的三维纳米结构。

在 20 世纪 70 年代,聚焦离子束(FIB)技术开始崭露头角。当时,致力于开发能够在微观尺度上精确操控材料的方法。FIB 技术的雏形是利用离子束对材料进行简单的溅射和刻蚀,最初主要应用于材料表面分析和微加工的初步探索。此时,霍尔电流传感器的制造工艺正处于发展阶段,传统的加工方法难以满足对传感器微纳结构精确制造的需求。FIB 技术凭借其能够实现纳米级别的加工精度,开始被关注用于霍尔电流传感器制造的可能性。研究人员尝试利用 FIB 对传感器的电极结构进行刻蚀,以优化电极的形状和尺寸,提高传感器的性能。但由于早期 FIB 设备的稳定性和精度有限,应用范围较为狭窄,仅在实验室环境中进行初步尝试。

到了 80 年代,FIB 技术取得了显著进展。设备的稳定性和离子束聚焦精度大幅提升,使得在纳米尺度上进行复杂结构的加工成为可能。这一时期,FIB 技术在半导体制造领域得到广泛应用,为霍尔电流传感器的发展带来了新机遇。研究人员开始利用 FIB 技术制备霍尔电流传感器的关键部件,如纳米级的霍尔元件和高精度的电极结构。通过精确控制离子束的能量和剂量,能够精确地调整材料的电学性能,从而提高霍尔电流传感器的灵敏度和精度。同时,FIB 技术还用于在传感器的衬底上制造纳米级的图案和结构,改善传感器与衬底之间的界面特性,提升传感器的整体性能。这些应用使得霍尔电流传感器在一些高端电子设备中得到应用,如高性能的信号处理电路中的电流监测。

同一时期,聚焦电子束诱导沉积(FEBID)技术也开始兴起。利用高能电子束可以激活特定的前驱体气体,在样品表面实现局部的材料沉积。早期的 FEBID 技术主要用于制备简单的纳米结构,如纳米线和纳米点。由于其能够在特定位置精确沉积材料的特点,开始被考虑应用于霍尔电流传感器的制造。研究人员尝试利用 FEBID 技术在传感器的敏感区域沉积具有特殊电学性能的材料,以增强传感器的响应特性。但由于当时对前驱体气体的选择和沉积过程的控制不够成熟,沉积材料的质量和性能有待提高,应用范围相对有限。

进入 90 年代,FEBID 技术取得了重要突破。对前驱体气体的研究取得进展,开发出多种新型的金属有机前驱体,能够沉积出具有更优异性能的材料。同时,对沉积过程的精确控制技术不断完善,包括电子束的扫描方式、能量控制以及沉积环境的优化等。这使得 FEBID 能够制备出更加复杂和高质量的三维纳米结构。在霍尔电流传感器制造中,FEBID 技术被用于制造具有特殊几何形状和电学性能的纳米结构,如纳米级的霍尔元件阵列和复杂的电路连接结构。这些结构的引入显著提升了霍尔电流传感器的性能,如提高了传感器的灵敏度和响应速度,拓展了传感器的应用范围。此时,霍尔电流传感器开始应用于一些对精度要求极高的领域,如航空航天中的微小电流测量和卫星通信设备中的电流监测。

21 世纪以来,FIB 和 FEBID 技术不断发展并相互融合。FIB 技术在提高加工精度的同时,降低了离子束对样品的损伤,通过优化离子源和束流传输系统,减少了镓离子的植入污染。同时,FEBID 技术在提高沉积速率和材料纯度方面取得显著进步,通过改进前驱体气体的输送方式和反应条件控制,减少了副产物的残留。在霍尔电流传感器制造领域,FIB 和 FEBID 技术的结合应用成为研究热点。例如,利用 FIB 技术先对传感器的衬底进行精确的刻蚀和预处理,然后使用 FEBID 技术在特定位置沉积高质量的功能材料,构建出具有复杂结构和高性能的霍尔电流传感器。这种结合的工艺使得霍尔电流传感器在性能上得到极大提升,能够满足更多新兴领域的需求,如在生物医学检测中的微小电流检测、量子计算设备中的精确电流控制等。在生物医学检测中,霍尔电流传感器能够精确检测生物分子产生的微弱电流信号,为疾病诊断和药物研发提供关键数据支持;在量子计算设备中,精确的电流控制对于保证量子比特的稳

定性和计算准确性至关重要，FIB 和 FEBID 技术制备的霍尔电流传感器能够满足这种高精度的要求。

尽管聚焦离子束(FIB)和聚焦电子束诱导沉积(FEBID)技术在霍尔电流传感器制造工艺里有不少优势，但它们也存在一些局限性和挑战。FIB 技术中，镓离子的植入可能导致样品损伤或污染，影响材料的原始性能；此外，FIB 设备复杂且成本高昂，限制了其广泛应用。对于 FEBID 而言，沉积过程中的副产物残留及较低的纯度仍然是亟待解决的问题，这不仅影响沉积层的质量，也可能导致结构不稳定。同时，FEBID 的沉积速率相对较低，难以满足大规模工业生产的效率要求。综上所述，虽然 FIB 和 FEBID 为纳米科技提供了强大的工具，但在未来的研究与发展中，仍需针对这些缺点进行优化，以实现更高效、更纯净的微纳制造工艺[1] [7]-[9]。

4. 工艺对比与趋势展望

在霍尔电流传感器制备工艺的发展历程中，不同工艺在精度、生产规模、成本及典型应用等方面呈现出显著差异，各自推动着霍尔电流传感器不断迈向新的发展阶段。在霍尔电流传感器的制备工艺领域，各工艺特点鲜明，在精度、生产规模、成本及典型应用方面差异显著。

在霍尔电流传感器的制备工艺领域，不同技术各有优劣且差异显著。分子束外延(MBE)能实现原子级精度，在超高真空下精准调控薄膜生长，利于制造高灵敏度量子阱传感器，可设备成本极高，生长速率极慢，仅适用于小批量生产；化学气相沉积(CVD)精度为微米级，能满足大批量生产需求，成本适中，常用于石墨烯霍尔传感器制备，只是高温环境易损害温度敏感基材，设备复杂且反应条件苛刻易引入杂质；金属有机化学气相沉积(MOCVD)作为 CVD 特殊形式，可精确控制原子级材料生长，适用于 III~V 族和 II~VI 族半导体材料，能制备高性能 GaAs 基霍尔元件，常用于汽车电子领域霍尔传感器制造，能大批量生产，精度达亚微米级，但金属有机前驱体昂贵且有毒，对反应参数控制要求极高；聚焦离子束(FIB)具备纳米级加工精度，常用于纳米探针与微结构修复等定制化生产，可设备复杂、成本高昂，镓离子植入还可能损伤样品；聚焦电子束诱导沉积(FEBID)能实现亚 10 纳米精度，适合制备复杂三维纳米结构，如三维纳米霍尔传感器，然而其沉积速率低、副产物残留及纯度问题突出，目前主要应用于实验室研究。[10] [12] [13]综上所述，结合表格来看(见表 1)。

Table 1. Comparison of preparation processes
表 1. 制备工艺对比

工艺	精度	生产规模	成本	典型应用
MBE	原子级	小批量	极高	高灵敏度量子阱传感器
MOCVD	亚微米级	大批量	高	GaAs 基霍尔汽车传感器
CVD	微米级	大批量	中	石墨烯霍尔传感器
FIB	纳米级	定制化	极高	纳米探针与微结构修复
FEBID	亚 10 纳米	实验室	极高	三维纳米霍尔传感器

5. 趋势展望

从当前霍尔电流传感器制备工艺的发展态势来看，未来将呈现出以下几个重要趋势。
首先是工艺集成化。单一的制备工艺往往存在局限性，而将多种工艺有机结合有望突破性能瓶颈。例如将 MBE 的高精度薄膜生长与 FIB/FEBID 的微纳加工技术集成，先用 MBE 生长高质量的半导体薄膜作为基础，再利用 FIB 进行精确的微结构刻蚀和 FEBID 沉积特殊功能材料，构建出兼具高精度和复杂结

构的高性能霍尔电流传感器,满足如生物医学检测、量子计算等新兴领域对传感器的严苛要求。

其次是成本控制。现有的多数先进制备工艺成本居高不下,严重阻碍了霍尔电流传感器在更广泛领域的大规模应用。未来需在不牺牲性能的前提下,通过技术创新降低设备成本、提高生产效率来控制成本。对于MBE技术,可探索更高效的设备设计和运行模式以降低能耗和维护成本;对于MOCVD和CVD,优化反应流程、寻找更廉价且安全的前驱体材料以减少生产成本;对于FIB和FEBID,研发新型离子源和前驱体,提高加工效率和材料利用率,降低设备成本和运行成本。

再者是新型材料体系的开发。随着科技发展,对霍尔电流传感器性能要求不断提升,传统材料已难以满足。新型材料如二维材料(石墨烯、过渡金属硫族化合物等)、拓扑绝缘体等具有独特的电学、磁学性质,有望成为制备高性能霍尔电流传感器的理想材料。通过开发适用于这些新型材料的制备工艺,如探索适合二维材料生长的MBE或CVD工艺条件,研究新型材料与现有工艺的兼容性,能够进一步提升传感器的灵敏度、稳定性和响应速度,拓展其在新能源、人工智能等前沿领域的应用[2][11]。

6. 结论

综上所述,上述制备工艺在霍尔电流传感器的制备中各有特点。MBE和MOCVD在材料质量与规模化生产中各具优势,CVD凭借低成本在石墨烯传感器中不可替代,而FIB/FEBID为微型化提供关键技术支撑。未来需突破工艺成本与效率瓶颈,推动多工艺协同创新,以满足智能电网、自动驾驶等领域对高性能传感器的迫切需求。

参考文献

- [1] 王蒙. 霍尔电流传感器技术综述[J]. 山东工业技术, 2016(15): 135.
- [2] 彭泉. 高性能霍尔电流传感器芯片关键技术研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2024.
- [3] 张建军. 霍尔电流传感器设计关键技术研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [4] Kuze, N. and Shibasaki, I. (1997) MBE Research and Production of Hall Sensors. *III-VsReview*, **10**, 28-32. [https://doi.org/10.1016/S0961-1290\(99\)80054-4](https://doi.org/10.1016/S0961-1290(99)80054-4)
- [5] 刘湘祁. 基于化学气相沉积法制备的石墨烯薄膜在K⁺传感器中的应用[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.
- [6] Campesato, R., Flores, C., Passaseo, A. and Verni, S. (1992) Gaas Hall Sensors Made by the MOCVD Technique. *Sensors and Actuators A: Physical*, **32**, 651-655. [https://doi.org/10.1016/0924-4247\(92\)80058-b](https://doi.org/10.1016/0924-4247(92)80058-b)
- [7] 周莹, 薛民杰, 郝玉红, 等. 二维纳米栅格结构的聚焦离子束制备工艺[J]. 上海计量测试, 2024, 51(6): 15-18.
- [8] De Teresa, J.M., Fernández-Pacheco, A., Córdoba, R., Serrano-Ramón, L., Sangiao, S. and Ibarra, M.R. (2016) Review of Magnetic Nanostructures Grown by Focused Electron Beam Induced Deposition (FEBID). *Journal of Physics D: Applied Physics*, **49**, Article 243003. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/49/24/243003>
- [9] 李民亮. 基于石墨烯异质结的传感器制备与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江农林大学, 2024.
- [10] 曹庭锋. 石墨烯纳晶柔性霍尔传感器的制备与耐形变能力研究[D]: [硕士学位论文]. 深圳: 深圳大学, 2023.
- [11] 王兰雨. 宽温度霍尔传感器电路的研究与设计[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2023.
- [12] 郝婷婷. 聚焦离子束/电子束技术在三维纳米器件加工中的应用[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院物理研究所), 2018.
- [13] 郁鑫鑫, 沈睿, 于含, 等. MOCVD 生长的外延层掺杂氧化镓场效应晶体管[J]. 人工晶体学报, 2025, 54(2): 312-318.