

超宽禁带 AlN 材料及其器件应用的现状和发展趋势

何君, 李明月

(中国电子科技集团公司 第十三研究所, 石家庄 050051)

摘要: 作为一种 III-V 族化合物半导体材料, AlN 不仅具有超宽直接带隙 (6.2 eV)、高热导率、高电阻率、高击穿场强、优异的压电性能和良好的光学性能, 而且 AlN 晶体还与其他 III-N 材料具有非常接近的晶格常数和热膨胀系数。这些特点决定了 AlN 在 GaN 外延、紫外光源、辐射探测器、微波毫米波器件、光电器件、电力电子器件以及声表面波器件等领域具有广阔的应用前景。介绍了 AlN 材料在功率器件、深紫外 LED、激光器、传感器以及滤波器等领域的應用現狀, 并对 AlN 材料及其应用的未来发展趋势进行了分析和展望。

关键词: AlN; 超宽禁带; 光电器件; 电力电子器件; 声表面波 (SAW) 器件

中图分类号: TN304.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-353X (2019) 04-0241-10

Current Status and Development Trends of Ultra-Wide Bandgap AlN Materials and Their Application in Devices

He Jun, Li Mingyue

(The 13th Research Institute, CETC, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: As one of the III-V compound semiconductor materials, AlN has properties of ultra-wide direct bandgap (6.2 eV), high thermal conductivity, high electrical resistivity, high breakdown field strength, excellent piezoelectric properties and good optical properties, and AlN crystals have very close lattice constants and thermal expansion coefficients with other III-N materials. These characteristics determine the broad application prospects of AlN in the fields of GaN epitaxial, ultraviolet light source, radiation detector, microwave/millimeter wave devices, optoelectronic devices, power electronic devices and surface acoustic wave devices. The application status of AlN material in power electronic devices, deep ultraviolet LEDs, LDs, sensors and filters is introduced. Future development and application trends of AlN materials are analyzed and forecasted.

Key words: AlN; ultra-wide bandgap; optoelectronic device; power electronic device; surface acoustic wave (SAW) device

EEACC: 2520D

0 引言

AlN 材料具有很高的直接带隙 (6.2 eV), 是重要的蓝光和紫外发光材料; AlN 介电常数小, 具有良好热导率、高电阻率和击穿场强, 是优异的高温、高频和大功率器件材料; 沿 c 轴取向的 AlN 具

有良好的压电性和极高的声表面波 (SAW) 传输速度, 是极佳的 SAW 器件用压电材料。AlN 晶体与其他 III-N 材料具有非常接近的晶格常数和热膨胀系数, 与蓝宝石或 SiC 衬底相比, AlN 与 AlGaN 的晶格常数匹配、热匹配及化学兼容性更高, 作为 AlGaN 器件外延衬底时可大幅度降低器件中的缺陷

E-mail: cetclib_he@126.com

April 2019

Semiconductor Technology Vol.44 No.4 241

密度。AlN 的这些优良性能使其在众多领域中具有广阔的应用前景, 成为目前国际研究的热点。近年来, 国际上对 AlN 研究的热点主要包括以下几个方面^[1]: ① AlN 外延及制备技术; ② AlN 基器件衬底技术; ③ AlN 接触和掺杂层技术; ④ 深紫外 (DUV) 电子器件应用的 AlN 功能层特性; ⑤ AlN 深紫外 LED 和传感器技术; ⑥ AlN 深紫外激光器及其应用; ⑦ 使用 AlN 材料的电子器件技术 (HEMT、功率器件和高频器件); ⑧ AlN 材料的新应用 (压电器件、太赫兹器件、高温电子器件等)。

本文主要介绍了 AlN 材料的制备技术以及在功率器件、光电器件、电力电子器件、传感器以及滤波器等领域的应用现状, 并对 AlN 材料及其器件应用的未来发展趋势进行了分析和展望。

1 AlN 的制备方法

AlN 单晶的制备方法主要包括分子束外延 (MBE)、氢化物气相外延 (HVPE)、金属有机化合物气相淀积 (MOCVD) 和物理气相传输 (PVT) 法等。其中 HVPE、MOCVD 和 MBE 法多用来制备薄膜, HVPE 生长速度快 ($100\ \mu\text{m}/\text{h}$), 几乎是 MOCVD 和 MBE 法的 100 倍, 适合制作较厚的 AlN 薄膜^[2]。PVT 技术的基本原理为高温区 AlN 源的分解升华, 通过温度梯度驱动至籽晶表面重新凝华成晶体, 其生长速度比 HVPE 更快、晶体质量更高, 是目前制备大尺寸、高质量 AlN 体单晶最有前景的方法之一, 也是目前的国际研究热点。

目前美国 Crystal IS 公司和俄罗斯的 Nitride-Crystals 公司掌握了 PVT 法制备 AlN 晶体的核心技术, 在该领域处于领先地位, 2012 年已制备出直径大于 2 英寸 (1 英寸 = 2.54 cm) 的 AlN 体单晶^[3]。使用 PVT 法进行材料制备主要有 3 个研究方向^[4]: 籽晶自发成核技术; 同质外延自发成核技术; SiC 衬底上的异质外延引晶技术。自发成核技术获得的 AlN 晶体质量相对较高, 生长速度较快, 但无法实现大尺寸晶体; 同质外延成核技术是 AlN 晶体生长的最终目标, 然而大尺寸高质量晶体难以实现。随着 4 英寸 SiC 晶圆实现大规模商品化, 外延引晶技术无疑成为快速实现大尺寸 AlN 衬底最直接有效的方法, 然而该方法生长出来的

AlN 晶体杂质、位错和微管缺陷偏高, 可采用 SiC/AlN 复合籽晶生长技术制备出大尺寸 AlN 晶体。

2018 年, 美国的 I. Demir 等人^[5]报道了一种采用 MOCVD 法制备的“三明治”结构高质量 AlN, 这种较厚的 ($2\ \mu\text{m}$) 无断裂 AlN 材料制作在 *c* 平面蓝宝石衬底上, “三明治”结构是在两个较高温度 ($1\ 170\ ^\circ\text{C}$) 生长的 $250\ \text{nm}$ 厚的 AlN 层中夹有一层较低温度 ($1\ 050\ ^\circ\text{C}$) 生长的 $1\ 500\ \text{nm}$ 厚的 AlN 层, 这种结构使晶体质量和晶体表面形貌得到明显改观, $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ 面积的均方根粗糙度为 $0.71\ \text{nm}$ 。

与 MOCVD 和 MBE 法相比, HVPE 法生长速度快, 是一种具有发展前景的 AlN 薄膜制备技术, 但其生长效率低、成本高。2016 年, 俄罗斯的 V. N. Bessolov 等人^[6]报道了采用氯化物 HVPE 技术在 SiC/Si 衬底上制作无应变 (约为 $0.02\ \text{GPa}$) AlN 薄膜层的方法, 配合新型外延横向过生长 (ELO) 技术和悬空外延片技术制作出 $20\ \mu\text{m}$ 厚的 AlN 外延薄膜, 生长温度为 $1\ 080\ ^\circ\text{C}$, 生长速率为 $0.2\ \mu\text{m}/\text{min}$ 。

2016 年, 中国科学院物理研究所的胡伟杰等人^[7]采用 PVT 法制备了 1 英寸 AlN 单晶并对 p 型掺杂进行了研究。徐永宽等人^[8]和郝建民^[9]报道了在碳基单晶生长系统中采用 SiC 籽晶和在钨材质单晶生长系统中自发成核 PVT 法制备大尺寸 AlN 单晶及抛光片, 为 AlGaIn 器件使用 AlN 同质衬底提供了可能性。

2 AlN 在器件中的应用

AlN 主要用于微波毫米波器件、SAW 器件、紫外/深紫外 LED 以及电力电子器件。其中 AlN 紫外 LED 的输出功率已达到实用化需求, 紫外/深紫外探测器仍在研制阶段, 中功率吉赫兹级通信用 HEMT 和 SAW/体声波 (BAW) 压电器件正步入实用化阶段。此外, AlN 大功率电力电子器件进入快速发展期, 新型 AlN 器件如 MEMS 器件、太赫兹器件、高温器件等处于不断探索和开发中。

2.1 微波毫米波器件

AlN 在微波毫米波器件已有广泛应用, 如使用 AlN 缓冲层可使 GaN/Si 器件的电子迁移率比使用 SiC 或蓝宝石缓冲层提高 1~3 倍; AlN 成核层是在 Si 基底上外延生长 III-N 材料的重要步骤; 薄 AlN

势垒层可有效解决 GaN 器件由于势垒下降所引起的二维电子气 (2DEG) 密度下降问题; 高 Al 组分 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x>0.5$) /AlN 的击穿电压是 GaN 的 3 倍, 热导率是蓝宝石的 6 倍、GaN 的 1~2 倍, 是理想的沟道层材料; AlN 衬底与蓝宝石或 SiC 衬底相比可使 GaN 器件的位错密度从 10^8 cm^{-2} 下降到 10^5 cm^{-2} 数量级, 在 AlN 衬底上生长高 Al 组分 AlGaIn 薄膜具有更低的位错密度和自补偿特性, 因而展现出极高峰值导电性、载流子浓度和迁移率, 将成为替代蓝宝石或 SiC 的重要衬底材料^[10-15]。

2.1.1 HEMT 器件

AlN 通常用于 HEMT 器件的缓冲层和势垒层, 可使器件实现更高的输出功率、截止频率、抗辐射能力以及耐恶劣环境特性, 是宽禁带氮化物半导体和微电子领域的前沿技术。

2018 年, 美国桑迪亚实验室^[11]报道了高 Al 组分 (85%) $\text{AlN}/\text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{N}$ HEMT, 其结构如图 1 所示, 研究人员使用 AlN 势垒刻蚀去除和再生长工艺形成欧姆接触, 2DEG 电阻率接近 $4\,200\ \Omega/\square$, 击穿电压高达 810 V, 具有极佳的栅漏电流, 开关电流比 ($I_{\text{on}}/I_{\text{off}}>10^7$) 和亚阈值斜率 (75 mV/dec)。2017 年, S. Muhtadi 等人^[12]对蓝宝石衬底上 $3\ \mu\text{m}$ 厚的低缺陷 AlN 缓冲层 $\text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{N}/\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$ HEMT 器件进行了研究, 证明 AlN 缓冲层可提供足够高的热导率, 当源-漏间距为 $5.5\ \mu\text{m}$ 、栅长为 $1.8\ \mu\text{m}$ 时, 器件在栅偏压为 4 V 时的峰值漏电流高达 250 mA/mm , 器件可在 40 V 和 250 mA/mm 条件下稳定工作, 没有出现电流崩塌现象。2017 年, 德国弗劳恩霍夫研究所的 B. J. Godejohann 等人^[13]分别采用 MBE 和 MOCVD 法制作了 AlN/GaN HEMT, 并对两种方法进行了对比: 采用蓝宝石衬底 MBE 法生长出陡峭界面和纯 AlN 势垒层, Si 衬底 MOCVD 生长的 AlN 纯度不如 MBE 法, 器件的最高漏电流约为 1.46 A/mm , 栅源电压为 3 V, 截止频率为 89 GHz, 薄膜电阻小于 $200\ \Omega/\square$, 在 100 nm 栅长下 AlN/GaN HEMT 器件实现了极佳的高频和小信号特性。2018 年, 土耳其的 I. K. Durukan 等人^[14]推出了两种采用 MOCVD 法生长的不同 AlN 缓冲层厚度 (260 nm 和 520 nm) 的蓝宝石衬底 AlGaIn/AlN/GaN 异质结构 HEMT, 并对两种结果进行了对比, 通过 X 射线衍射 (XRD) 和原子力显微镜 (AFM) 进行研究, 其结果表明,

使用 260 nm 厚缓冲层的器件具有更多的凹坑和突起, 粗糙度更高。同年, 印度的 P. Murugapandiyan 等人^[15]报道了一种新型 T 型栅 20 nm 增强模式 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ HEMT, 器件采用重掺杂源-漏区和 Al_2O_3 钝化层, 截止频率 (f_t) 和最高振荡频率 (f_{max}) 分别为 325 GHz 和 553 GHz, 采用 2 nm 厚的 AlN 势垒层使峰值漏电流密度达到 3 A/mm , 约翰逊优值为 8.775 THz, 其良好特性使其成为下一代大功率毫米波 RF 应用的单片微波集成电路最合适的候选技术。

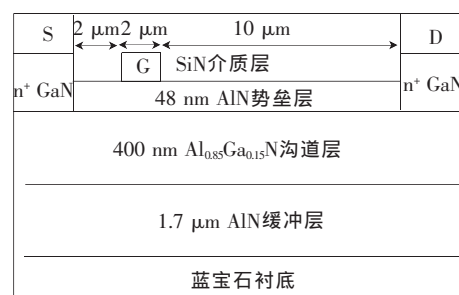


图 1 高 Al 组分 AlN/AlGaIn HEMT 结构示意图^[11]

Fig. 1 Structure diagram of the AlN/AlGaIn HEMT of high Al component^[11]

2018 年, 张力江等人^[16]在 SiC 衬底上制备低缺陷 AlN 缓冲层, 研制了一款 L 波段 350 W AlGaIn/GaN HEMT 大功率器件, 器件增益大于 13 dB, 效率高达 81%。可靠性试验结果表明, 器件抗失配能力达到 10:1。

2.1.2 FET 器件

AlN 通常用于 FET 器件的缓冲层、绝缘层、势垒层和衬底, AlN/GaN 异质结 FET 具有很高的 2DEG 面密度和电子迁移率, 传输特性优良, 在电力电子器件和射频器件领域有着非常广阔的应用前景。高温应用也是 AlN 异质结 FET 的重要优势之一。

2016 年, 日本的 N. Kurose 等人^[17]报道了一种 Si 衬底上通过形成纳米尺寸自发通孔成功制作的导电 AlN 缓冲层垂直型 AlGaIn FET, 通过在通孔中填充导电 n-AlGaIn 使 AlN 的垂直导电率提高了 1 000 倍, 通过这种导电通孔 AlN 技术成功设计出 350 nm 垂直型 UV-LED 和垂直型 UV 传感器, 193 nm 时的响应度达到 150 mA/W 。同年, 日本的 R. G. Banal 等人^[18]报道了一种采用 AlN 绝缘层的 AlN/ Al_2O_3 堆叠栅 H 终端金刚石金属-绝缘体-半导体场效应晶体管 (MISFET), 5 nm 厚的 Al_2O_3 层和

175 nm 厚的 AlN 膜分别采用原子层淀积和溅射淀积技术完成, MISFET 的最大漏-源电流、阈值电压以及最大非本征跨导分别为 -8.89 mA/mm , -0.22 V 以及 6.83 mS/mm 。

2016 年, S. Bajaj 等人^[19]报道了一种在蓝宝石上 AlN 衬底上制作的超宽带隙 $\text{Al}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{N}$ 沟道 MISFET, 采用梯度极化接触技术和凹槽栅结构, 栅介质为原子层沉积的 Al_2O_3 , 器件结构如图 2 所示。高组分沟道比接触电阻率低至 $1 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$, 该项研究工作使得超宽带隙 AlGaIn 基器件广泛应用于电子器件和光电器件。

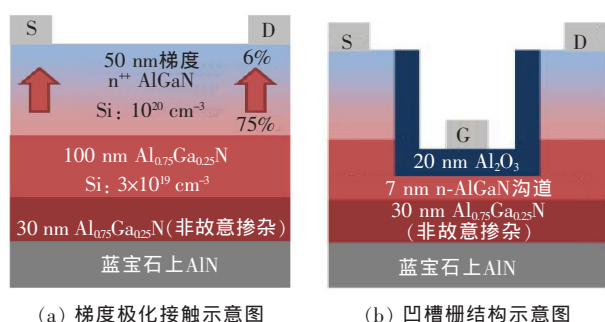


图 2 $\text{Al}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{N}$ 沟道 MISFET 结构图^[19]

Fig. 2 Structure schematics of $\text{Al}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{N}$ channel MISFET^[19]

2017 年, 美国康奈尔大学和圣母大学联合^[20]推出在单晶 AlN 衬底上采用 MBE 法外延无应变 GaN 量子阱 AlN/GaN FET, AlN/GaN/AlN 量子阱双异质结构使该类器件获得了最高迁移率 ($601 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 和最低薄膜电阻 ($327 \Omega/\square$), 2DEG 密度大于 $2 \times 10^{13} / \text{cm}^2$ 。栅长为 65 nm, 器件的 DC 漏极电流高达 2.0 A/mm 并创下当时最高记录, 非本征跨导峰值为 250 mS/mm , 电流截止频率约为 120 GHz, 通过采用宽带隙厚 AlN 势垒层使 FET 的击穿特性和热处理能力得到极大改善, 为未来实现高压和大功率微波应变量子阱氮化物晶体管提供了技术基础。

2.2 光电子器件

光电子器件领域是 AlN 发展最为成熟的领域之一, AlN 衬底较低的位错密度 (典型值为 10^5 cm^{-2}) 已被证实优于 Si、SiC 和蓝宝石衬底器件, 可极大地提高深紫外发光二极管、激光器和探测器的发光效率。目前已有采用 AlN 衬底的深紫外 LED 产品的销售, 而 AlN 激光二极管 (LD) 和雪崩光电二极管 (APD) 探测器尚未进入实用化。

通过使用 AlN 晶体衬底可使发光波长从 UVA (400~320 nm)、UVB (320~280 nm) 扩展到 UVC (280~200 nm), 使用 Mg 掺杂 AlN 纳米线阵列可有效改善材料的导电性, 可实现高效深紫外光电器件^[21]。

2.2.1 LED

大多数 AlN UV-LED 异质结构生长在 *c* 平面蓝宝石衬底上, 如图 3 所示^[22]。一般采用 MOCVD 生长技术, 典型生长温度为 $1000 \sim 1200 \text{ }^\circ\text{C}$, 有时可达 $1500 \text{ }^\circ\text{C}$, 广泛应用于照明、医疗、水资源净化等领域, 具有巨大的经济价值, 但存在外部量子效率低 (小于 10%) 等缺陷^[23]。

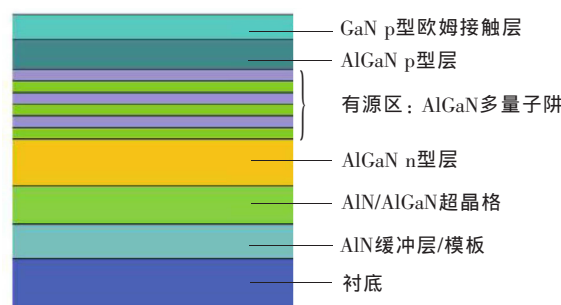


图 3 使用 AlN 缓冲层的深紫外 LED 的典型外延结构图^[22]

Fig. 3 Typical epitaxial structure schematic of DUV LED with AlN buffer layer^[22]

2017 年, 日本信息通信研究机构的 S. I. Inoue 等人^[23]报道了深紫外 AlGaIn 基 LED 在波长 265 nm、输出功率大于 150 mW 下, 采用大面积纳米图形结构制作 LED, 使光提取效率提高了 3 倍, 可满足实用化需求, 为深紫外 AlGaIn 基 LED 大规模应用奠定了基础。

2018 年, 美国威斯康星大学麦迪逊分校的 D. Liu 等人^[24]报道了一种在 AlN 本体单晶衬底上使用 p 型 Si 增强空穴注入 400 nm 厚的 AlN 同质外延 229 nm UV-LED, 氮化物异质结构使用金属有机化学气相外延 (MOVPE) 法淀积, 76 A/cm^2 电流密度连续波工作状态下 $\text{AlN}/\text{Al}_{0.77}\text{Ga}_{0.23}\text{N}$ 多量子阱 (MQW) LED 未出现效率下降, 实现了本体衬底固有的低位错密度特性, 证实了该结构是实现 UVC LED 的有效方法, 未来也可用于激光器中。2018 年, 德国的 N. Susilo 等人^[25]报道了一种采用 MOVPE 法生长在溅射和高温退火 (HTA) AlN/蓝宝石衬底上的 AlGaIn 基 DUV LED, 这种 350 nm 结构与常规 ELO AlN/蓝宝石 LED 相比, 具有相似的缺陷密度、输出功率特性和外部量子效率

(EQE), 但曲率 (-80 km^{-1}) 比 ELO 结构低 1 倍, 且降低了复杂性和成本。2018 年, 中国科学院半导体研究所的 L. Zhao 等人^[26]推出了一种在溅射淀积 AlN 模板上制作的 AlGaIn 基 UV-LED, 把外延 AlN/AlGaIn 超晶格结构插入 LED 结构和 AlN 模板之间以降低位错密度, 这种 282 nm LED 的光输出功率在 20 mA 时达到 0.28 mW, 外部量子效率为 0.32%。

2.2.2 激光器

AlN UV 激光器适用于激光显微、光谱仪、质谱仪、表面分析、材料处理以及激光光刻等领域。国际上有关 AlN 紫外激光器的研究相对较少, 实现高质量 AlN 激光器的重要突破是 AlN 模板与 AlN 衬底的相互结合。

2016 年, R. Kirste 等人^[27]采用 AlN 衬底制作出 265 nm 室温 AlGaIn 紫外激光器, 输出功率大于 80 mW; 同年, C. Liu 等人^[28]研制了一款采用 MOCVD 在半极化 AlN 衬底上制作的波长为 250 ~ 300 nm 的 AlInN/GaN 量子阱紫外激光器, 有源区设计包括一个 2.4 nm 厚的 $\text{Al}_{0.91}\text{In}_{0.09}\text{N}/\text{Al}_{0.82}\text{In}_{0.18}\text{N}$ 触发层, 0.3 nm 厚的晶格匹配 GaN 层, 超薄 GaN 层的作用是把电子-空穴波函数定位于量子阱 (QW) 中心位置, 从而实现较高的水平极化光增益, 与传统的 AlGaIn QW 系统相比, 255 nm 波长下 AlInN-GaN QW 结构的水平极化光增益提高了 3 倍, 高达 3726 cm^{-1} , 通过调整 GaN 的厚度可为 UV 激光器提供一种更加高效的有源区设计方案。

2.2.3 光电探测器

基于宽禁带半导体材料 (AlN 和 GaN 等) 的紫外探测器由于在紫外天文学、紫外探测、紫外通信、生物化学分析、火焰检测等领域的潜在应用得到了广泛研究^[29]。

2017 年, 德国费迪南德·布劳恩研究所^[30]研制出的日盲型 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}/\text{AlN}$ 金属-半导体-金属 (MSM) 光电探测器使用薄吸收层和非对称电极设计, 在低电压 (1 V) 条件下实现了较高的外部量子效率值 (25%), 这种底部照明探测器使用 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$ 吸收层和 AlN 缓冲层异质界面, 通过使用对称探测和高密度电极对等综合设计使 EQE 得到进一步提升。2017 年, 美国东北大学的 Z. Y. Qian 等人^[31]推出了基于高品质因数 (Q) 的 50 nm 厚的 AlN 压电谐振纳米盘的纳机电系统

(NEMS) 红外探测器, 实现了高热阻 ($9.2 \times 10^5 \text{ K/W}$) 和高品质因数 (1 000), 这种 AlN NEMS 谐振红外探测器具有超快热响应时间 (80 μs), 探测器的外形尺寸下降到 $20 \mu\text{m} \times 22 \mu\text{m}$, 品质因数提高了 4 倍。

国内将 AlN 材料应用于紫外探测器的研制也取得了较好的成果, 2018 年, 上海大学的沈悦等人^[32]对其 AlN/CdZnTe 基紫外光探测器制备方法及应用技术申请了专利, 在 1 mm 厚的 AlN 衬底上快速生长了大面积、高质量 CdZnTe 薄膜, 从而使设计的紫外光探测器具有极端环境适应性, 以及较强的紫外光响应性。2018 年, 中山大学的 W. Zheng 等人^[33]报道了一种采用高结晶度多步外延生长技术实现的背靠背型 p-Gr/AlN/p-GaN 光电探测器, 使用 AlN 作为光发生载体的真空紫外吸收层, 并使用 p 型石墨烯 (透射率大于 96%) 作为透明电极来收集受激空穴, 实现的新型真空紫外光伏检测异质结探测器取得了较理想的光响应度、高外部量子效率, 以及极快的温度响应速度 (80 ns), 比传统光导器件的响应速度提高了 $10^4 \sim 10^6$ 倍, 这种新技术为实现理想的零功耗集成紫外光伏探测器提供了技术支撑, 可使未来空间系统实现更长的服役期和更低的发射成本, 同时实现更快速的星际目标探测。

2.3 SAW 器件

在已知压电材料中, AlN 薄膜的 SAW 传播速度是最快的, 且 AlN SAW 器件具有良好的化学和热稳定性, 以及对外界环境如压力、温度、应力、气体等具有极高的灵敏性, 与常规传统 Si CMOS 技术相兼容, 因而成为无源传感、无线传感和移动信号处理的关键部件。随着最近十几年来无线通信技术的飞速发展, SAW 传感器、谐振器和滤波器在实现小型化、多功能和高性价比方面有望取代传统半导体器件, 成为未来复杂系统的核心技术^[34]。

2.3.1 滤波器

AlN 滤波器主要包括兰姆波谐振滤波器和 SAW/BAW 滤波器, 兰姆波谐振滤波器在未来单芯片多波段无线通信 RF 前端系统中使用较多, 与 SAW 滤波器相比更具尺寸优势; AlN 在 SAW/BAW 滤波器中的应用较为成熟, 已实现商品化, SAW 滤波器多用于中频, BAW 滤波器更适合高频应用,

且 Q 值更高, 将在 4G/5G 等通信领域得到广泛应用。

2015 年, 天津大学的 J. Liang 等人^[35]推出了一种基于 AlN 兰姆波谐振器的超小型 140 MHz 窄带滤波器, 采用梯状兰姆波谐振器 (LWR) 结构, 导带插入损耗为 2.78 dB, 为节约空间进行了优化设计, 把电容与 LWR 单片集成在一起, AlN 夹在钼电极中形成三明治结构, 分别用作谐振器的压电层和电容器的介质层, 在 RF 通信前端具有很好的应用前景。

2017 年, 美国卡内基梅隆大学的 E. Calayir 等人^[36]通过 AlN MEMS 和 CMOS 芯片的 3D 异质集成, 实现了一种带有自修复功能的窄带滤波器, 并且把 12 个相同的 1.15 GHz AlN MEMS 子滤波器阵列制作在一个 8 英寸 Si 器件上, 使滤波器的插入损耗小于 3.4 dB, 带外抑制 (OBR) 大于 15 dB, 通过在 AlN MEMS 芯片上使用重新分布层使寄生电容下降到原来的 1/20, 电阻下降到原来的 1/5。

2017 年, 美国 Akoustis 技术公司的 J. B. Shealy 等人^[37]开发出了一款在 SiC 衬底上生长单晶 AlN 压电外延膜的 3.7 GHz 宽带低损耗 BAW 滤波器, 尺寸为 1.25 mm×0.9 mm, 插入损耗为 2.0 dB, 器件结构包括生长在 150 mm 4H-SiC 衬底上的 0.6 μm 厚的 AlN 外延层, 8 层掩模双面晶圆工艺包括溅射淀积金属电极和采用 SiC 衬底减薄工艺获得的谐振器。该谐振滤波器为实现高频移动、WiFi 及其基础设施应用的小型化、大功率和高性能滤波器提供了支持。

2.3.2 传感器

虽然 MEMS 传感器及其阵列的主流技术仍以 Si 工艺为主, 但 AlN MEMS 传感器的研究已广泛开展起来, 薄膜本体声波传感器在电子鼻和胎压检测等领域应用较多。目前 AlN 传感器的研究一般是将多个传感器单元集成在同一衬底上, 形成传感器阵列, 采用激光微加工刻蚀技术进行工艺设计。2015 年, 俄罗斯的 K. A. Tsarik 等人^[38]报道了一种采用 AlN 外延膜制作的 AlN/AlGaIn/GaN HEMT SAW 传感器, 使用纳米级 T 型栅和极低厚度势垒, 这种单片多层异质结构 (MHS) 传感器制作在 SiC 衬底上, 采用 MBE 生长氮化物层, MHS 使用厚度为 2 μm 的高温 AlN 缓冲层把 HEMT 与声电子学功

能连接起来, 测得的 SAW 的相变灵敏度为 6°, 主要应用于生物医学领域。2015 年, 法国的 A. Bongrain 等人^[39]报道了一种制作超薄 AlN 压电传感器的新技术, 采用 CMOS 技术提高了工艺兼容性, 证明了把压电 AlN 薄膜淀积在 Pt 上具有更好的压电特性, 同时降低了成本, 有利于实现单片集成, 对于技术的普及和推广十分有益, 主要应用于医学检测领域。2015 年, Z. Bao 等人^[40]制作出一种 SAW 基高灵敏 AlN 薄膜应变传感器, 用于传感器网络, 在 AlN 薄膜上制作了叉指式转换器 (IDT), 多层膜包括 Si 衬底上的 AlN 和 Pt/Ti, 以及 SiO₂ 层, SiO₂ 层用于声-电隔离和温度补偿, Pt 膜用于形成 c 轴取向 AlN 膜籽晶层, 器件的 Q 值和有效电子机械耦合系数分别为 700 和 0.46%, 该传感器在低温 (小于 400 °C) 下制作而成, 可以使用 IC 后处理技术嵌入到单片振荡器中。2017 年, 印度的 S. Yenuganti 等人^[41]推出了一种采用硅岛支撑结构的带有 AlN 压电型 SiN 谐振梁的微型压力传感器, 两层 AlN 压电膜夹在两层金属电极中, 淀积在 SiN 谐振梁的边端, 用于谐振致动和传感, 下层电极完全埋入 AlN 压电层中。2017 年, 清华大学的 S. L. Fu 等人^[42]报道了一种在蓝宝石衬底上采用 DC 磁控溅射法制作的 AlN 外延膜, 使用 10 nm 厚的 ZnO 缓冲层极大地改善了 AlN 外延膜的质量, 并释放了膜应力。制备的 SAW 器件获得了近零应力和极低插损, 中心频率为 1.4 GHz, 相位速度为 5 600 m/s, 适用于通信领域的微传感器和微流量计。

2018 年, 美国 Cornell 大学的 M. Abdelmejeed 等人^[43]报道了一种 CMOS 兼容吉赫兹超声脉冲相移基超高速、高分辨率和宽温度范围传感器, 其超声脉冲产生于制作在 Si 衬底上的 3 μm 厚的 AlN 压电薄膜转发器, 通过检验证明该传感器在 30 ~ 120 °C 温度范围时相移温度系数为 12°/°C, 器件的谐振频率为 1.6 GHz, 数据采集时间为 600 ns, 实现了极高的线性特性。

2018 年, 美国 Illinois 大学的 M. Kabir 等人^[44]报道了一种 AlN 薄膜压电 MEMS 声发射传感器, 这种传感器制作在 Si 衬底上, 可在柔性和刚性体两种模式下工作, 此 MEMS 器件包括两种不同频率 (40 kHz 和 200 kHz) 的传感器, 微结构层包括掺杂硅、AlN 和金属层, 分别用作底部电极、传感

层和顶部电极层, 0.5 μm 厚的 AlN 用于制作压电薄膜, 该 MEMS 传感器使用 100 个单元的 10×10 阵列结构 (约 1 cm^2), 用来替代传统的声发射传感器。

2.3.3 谐振器

AlN 谐振器一般采用两种常规结构, 一是薄膜本体声波谐振器 (FBAR), 另一种是等高线模式谐振器 (CMR), FBAR 显示出比 CMR 更高的电子-机械耦合系数 (k_t^2), 而 CMR 在实现片上小型化方面更具优势, 两种结构的核心技术都是 AlN 薄膜制备工艺, 通过调整 AlN 膜的厚度和质量可获得理想的器件频率。 c 轴取向 AlN 薄膜磁控溅射和干法刻蚀工艺是决定 CMR 谐振器性能的关键工艺, 因与 CMOS 工艺相兼容, 且易于在单芯片上集成多频器件, 成为实现小尺寸、高品质因数、高频、低阻特性的保证, 是下一代无线通信系统中的实用技术^[45]。

2015 年, C. Cassella 等人^[46] 提出一种集成了 FBAR 和 CMR 两种谐振器优势的超高频 AlN MEMS 二维模式谐振器 (2DMR), 可以同时激发横向和纵向的声波, 这种谐振器使用在两层相同金属栅中间夹 5.9 μm 厚的 AlN 膜的三明治结构, 在顶部和底部同时使用叉指型转换器, 增加了设计灵活性, 并获得了较高的电子-机械耦合系数 ($k_t^2 > 3.4\%$) 和较低的动态电阻, 机械品质因数大于 2 400, 品质因数接近 40, 中心频率的光刻变化大于 10%。2015 年, C. Li 等人^[47] 研制出一种用于高温 (500 $^\circ\text{C}$) 传感器的 AlN SAW 谐振器, AlN 薄膜采用室温下两步生长法淀积在 Pt (50 nm) /Si 衬底上, 为消除 AlN 和 Pt 之间的晶格失配需要在 Pt 界面先淀积一层 200 nm 厚的富 N AlN 缓冲层, 之后高速淀积 2 μm AlN 薄膜, 这种 AlN 谐振器采用的是 Pt 底部悬浮电极, 可实现更高的温度敏感性。2017 年, 美国桑迪亚实验室的 M. D. Henry 等人^[48] 推出一种用于 RF 滤波器的 AlN 和 $\text{Sc}_{0.12}\text{Al}_{0.88}\text{N}$ CMR 谐振器, 在 AlN 中引入钪 (Sc) 能极大地增强压电极化效应, ScAlN 压电膜可改进有效耦合系数 (k_{eff}^2), 同时保证谐振器具有良好的品质因数。

2017 年, 清华大学的 W. Z. Wang 等人^[49] 报道了一种尺寸为 $1\,107 \mu\text{m} \times 721 \mu\text{m}$ 的 AlN/4H-SiC 多层结构 SAW 谐振器, 这种谐振器采用 MEMS 兼容工艺制作而成, c 轴取向 2 μm 厚的 AlN 薄膜采用

RF 反应磁控溅射工艺淀积在 4H-SiC 衬底上, AlN 的衍射峰值为 36.10° , 最低半峰全宽值 (FWHM) 仅为 1.19° , 同样适合在恶劣环境中应用。2017 年, 新加坡的 N. Wang 等人^[50] 报道了采用硅通孔 (TSV) 集成技术的 AlN 压电谐振器, 1 μm 厚的 AlN 压电薄膜夹在两层约为 0.2 μm 厚的 Mo 电极之间, 谐振频率大于 2 GHz, 动态阻抗小于 10 Ω , 可用于高频段长期演进 (LTE) 通信领域, 在 $-40 \sim 125 \text{ }^\circ\text{C}$ 进行 750 次热循环试验之后没有出现频率漂移, 因其超级可靠性和长期稳定性深受青睐。2018 年, 中国科学院的 S. Yang 等人^[51] 推出了一种 1 μm 厚的 AlN/蓝宝石双层衬底上制作的单端 SAW 谐振器, 并对 SAW 波长 (λ)、叉指转换器的孔径 (L_{IDT})、反射器光栅的数量 (N_{ref}) 以及反射器类型等参数对 AlN 谐振器的性能影响进行了分析, 当 $\lambda = 8 \mu\text{m}$ 时声波速度为 $5\,536 \text{ ms}^{-1}$, 最大回波损耗幅差值为 0.42 dB, k_t^2 为 0.168%, 从而使 L_{IDT} 从 80 μm 上升为 240 μm , 且非常适合高温传感器的应用。

2.4 电力电子器件

AlN 具有极高的临界电场、高关态阻断电压、超低导通电阻、超快开关速度以及耐恶劣环境等优势, 成为制备耐高压、高温电力电子器件的理想选择, 在汽车电子、电动机车、高压输电及高效功率转换等方面具有较大潜力。据预测, AlN 器件的功率处理能力是 SiC 和 GaN 的 15 倍, 因此被冠名为“下一代电力电子器件材料”^[52-53], 此外开发单晶低位错密度 AlN 衬底 (小于 10^3 cm^{-2}) 是实现高质量富 Al AlGaIn 薄膜的基础, 在 AlN 同质衬底上生长富 Al AlGaIn 薄膜与蓝宝石衬底相比可使电阻率极大下降^[54]。

2016 年, 日本的 H. Nogawa 等人^[55] 报道了一种采用新型薄 AlN 衬底制作的大功率绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 模块, 实现了高热耗散能力和高功率密度, 有望应用于逆变器、工业自动化、再生能源以及电动机车领域, 新的 AlN 薄绝缘衬底采用三种工艺实现: 优化烧结条件加强 AlN 衬底的强度, 改变铜线设计以降低应力, 优化设计保证绝缘能力, 使薄层 AlN 衬底的热导率达到 $170 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 强度 500 MPa, 热膨胀系数为 $10^{-6}/\text{K}$, 有效抑制了衬底下焊接断裂的传播, 极大地提升了 IGBT 的使用寿命。2016 年, 德国的

S. Moench 等人^[56]提出了一种用于 2 kW 单相光伏逆变器的导热型 AlN 功率模块, 这种采用 SiC 沟槽型 MOSFET 的半桥和全桥功率模块使用了 AlN 衬底混合式集成栅驱动器, 采用电-热联合仿真和 Al 热沉, 实现了高开关频率和低热阻, 直接键合铜 AlN 衬底厚度为 0.63 mm, 最大输出功率 2 kW, 结-热沉热阻为 0.3 K/W, 美国加州能源协会 (CEC) 效率为 95.4%, 功率密度为 3.14 kW/l, 超高热导率为 $170 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 为实现小型、高效电力电子系统提供了支撑。2016 年, 西安电子科技大学的 S. Yang 等人^[57]报道了带有等离子体增强原子层淀积 (PEALD) AlN/GaN 异质结构的新型垂直 GaN 沟槽结构功率器件, 新结构在完成 n-高阻层-n GaN 外延沟槽刻蚀之后采用 PEALD 法淀积了 3~5 nm 厚的 AlN 层, 实现了具有高电子密度和迁移率的垂直 2DEG 沟道, 阈值电压为 2 V, 与传统 GaN MOSFET 相比, 这种新型器件实现了 9 倍跨导和 $9 \text{ kA}/\text{cm}^2$ 的极高漏电流密度, 在未来功率开关领域具有应用优势。

3 结语

国内 AlN 材料和器件技术与国际相比差距较大, 要实现大尺寸、高质量、可批量化自主生产的 AlN 材料还需在材料制备技术方面如: AlN 块体单晶的 PVT 和 HVPE 技术研究等进行深入研究; 开展 AlN 高温高频大功率 HEMT、异质结 FET 和 MISFET 微波毫米波器件、260~280 nm 波长紫外 LED、高 Al 组分 AlGaN 紫外 APD 探测器、SAW/BAW 滤波器件等方面的研究。未来 AlN 材料将在微波毫米波器件、光电子器件、微机械和电力电子等领域发挥巨大的作用。

参考文献:

- [1] BICKERMANN M, COLLAZO R, MONROY E, et al. AlN and AlGaN materials and devices [J]. *Physica Status Solidi: a*, 2017, 214 (9): 1770155-1 - 1770155-13.
- [2] VOLKOVA A, IVANTSOV V, LEUNG L. Hydride vapor phase epitaxy of high structural perfection thick AlN layers on off-axis 6H-SiC [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2011, 314 (1): 113-118.
- [3] 赵超亮, 宋波, 张幸红, 等. 氮化铝晶体生长技术的研究进展 [J]. *材料导报*, 2012, 26 (9): 11-14.
- [4] ZHAO C L, SONG B, ZHANG X H, et al. Research progress in growth of aluminum nitride crystal [J]. *Materials Review*, 2012, 26 (9): 11-14 (in Chinese).
- [5] HARTMANN C, DITTMAR A, WOLLWEBER J, et al. Bulk AlN growth by physical vapour transport [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2014, 29 (8): 084002-1-084002-10.
- [6] DEMIR I, LI H, ROBIN Y, et al. Sandwich method to grow high quality AlN by MOCVD [J]. *Journal of Physics: D*, 2018, 51 (8): 085104-1-085104-12.
- [7] BESSOLOV V N, KARPOV D V, KONENKOVA E V, et al. Pendeo-epitaxy of stress-free AlN layer on a profiled SiC/Si substrate [J]. *Thin Solid Films*, 2016, 606: 74-79.
- [8] 胡伟杰, 张泽盛, 赵萌, 等. 氮化铝单晶生长与 p 型掺杂研究 [C] // 中国晶体学会第六届学术年会暨会员代表大会. 北京, 中国, 2016: 12.
- [9] 徐永宽, 金雷, 程红娟, 等. 不同颜色 AlN 单晶缺陷研究 [J]. *人工晶体学报*, 2018, 47 (7): 1340-1345.
- [10] XU Y K, JIN L, CHENG H J, et al. Defects investigation of AlN crystals with different colors [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2018, 47 (7): 1340 - 1345 (in Chinese).
- [11] 郝建民. 新型晶体材料新进展及面临的挑战 [C] // 中国电子材料行业协会半导体材料分会. 天津, 中国, 2018: 119-143.
- [12] ISAAC B, ZACHARY B, SHUN W, et al. Doping and compensation in Al-rich AlGaN grown on single crystal AlN and sapphire by MOCVD [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112 (6): 062102-1-062102-5.
- [13] BACA A G, ARMSTRONG A M, ALLERMAN A A, et al. An AlN/Al_{0.85}Ga_{0.15}N high electron mobility transistor [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 109 (6): 033509-1-033509-4.
- [14] MUHTADI S, HWANG S M, COLEMAN A, et al. High electron mobility transistors with Al_{0.65}Ga_{0.35}N channel layers on thick AlN/sapphire templates [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2017, 38 (7): 914-917.
- [15] GODEJOHANN B J, TURE E, MULLER S, et al. AlN/GaN HEMTs grown by MBE and MOCVD: impact of Al distribution [J]. *Physica Status Solidi: b*, 2017, 254 (8): 1600715-1-1600715-5.
- [16] DURUKAN I K, AKPINAR Ö, AVAR C, et al. Analyzing the AlGaN/AlN/GaN heterostructures for HEMT applications [J]. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 2018, 13 (3): 331-334.

- [15] MURUGAPANDIYAN P, RAVIMARAN S, WILLIAM J, et al. DC and microwave characteristics of L_g 20 nm T-gate enhancement mode $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}/\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{N}$ high electron mobility transistor for next generation high power millimeter wave applications [J]. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 2018, 13 (2): 183–189.
- [16] 张力江, 默江辉, 崔玉兴, 等. L 波段 350 W AlGaIn/GaN HEMT 器件研制 [J]. *半导体技术*, 2018, 43 (6): 437–442.
ZHANG L J, MO J H, CUI Y X, et al. Research and fabrication of L-band 350 W AlGaIn/GaN HEMT [J]. *Semiconductor Technology*, 2018, 43 (6): 437–442 (in Chinese).
- [17] KUROSE N, OZEKI K, ARAKI T, et al. Realization of conductive AlN epitaxial layer on Si substrate using spontaneously formed nano-size via-holes for vertical AlGaIn high power FET [C] // *Proceedings of Compound Semiconductor Week [Includes the 28th International Conference on Indium Phosphide & Related Materials (IPRM) & the 43rd International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS)]*. Toyama, Japan, 2016: 1–1.
- [18] BANAL R G, IMURA M, LIU J W, et al. Structural properties and transfer characteristics of sputter deposition AlN and atomic layer deposition Al_2O_3 bilayer gate materials for H-terminated diamond field effect transistors [J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 120 (11): 115307–1–115307–7.
- [19] BAJAJ S, AKYOL F, KRISHNAMOORTHY S, et al. Ultra-wide bandgap AlGaIn channel MISFET with polarization engineered ohmics [C] // *Proceedings of the 74th Annual Device Research Conference*. Newark, DE, USA, 2016: 7548394–1–7548394–2.
- [20] QI M, LI G W, GANGULY S, et al. Strained GaN quantum-well FETs on single crystal bulk AlN substrates [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110: 063501–1–063501–4.
- [21] TRAN N H, LE B H, ZHAO S R, et al. On the mechanism of highly efficient p-type conduction of Mg-doped ultra-wide-bandgap AlN nanostructures [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110 (3): 032102–1–032102–5.
- [22] 王军喜, 闫建昌, 郭亚楠, 等. 氮化物深紫外 LED 研究新进展 [J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2015, 45 (6): 067303–1–067303–20.
WANG J X, YAN J C, GUO Y N, et al. Recent progress of research on III-nitride deep ultraviolet light-emitting diode [J]. *Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2015, 45 (6): 067303–1–067303–20 (in Chinese).
- [23] INOUE S I, TAMARI N, TANIGUCHI M. 150 mW deep-ultraviolet light-emitting diodes with large-area AlN nanophotonic light-extraction structure emitting at 265 nm [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110 (14): 141106–1–141106–5.
- [24] LIU D, CHO S J, PARK J, et al. 229 nm UV LEDs on aluminum nitride single crystal substrates using p-type silicon for increased hole injection [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112 (8): 081101–1–081101–4.
- [25] SUSILO N, HAGEDORN S, JAEGER D, et al. AlGaIn-based deep UV LEDs grown on sputtered and high temperature annealed AlN/sapphire [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112: 041110–1–041110–5.
- [26] ZHAO L, ZHANG S, ZHANG Y, et al. AlGaIn-based ultraviolet light-emitting diodes on sputter-deposited AlN templates with epitaxial AlN/AlGaIn superlattices [J]. *Superlattices and Microstructures*, 2018, 113: 713–719.
- [27] KIRSTE R, SARKAR B, KAESS F, et al. Challenges and breakthroughs in the development of AlGaIn-based UVC lasers [C] // *Proceedings of the 74th Annual Device Research Conference*. Newark, DE, USA, 2016: 7548515–1–7548515–2.
- [28] LIU C, OOI Y K, ZHANG J. Proposal and physics of AlIn-delta-GaN quantum well ultraviolet lasers [J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 119 (8): 083102–1–083102–4.
- [29] ZHOU X Y, HAN T T, LÜ Y J, et al. Large-area 4H-SiC ultraviolet avalanche photodiodes based on variable-temperature reflow technique [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2018, 39 (11): 1724–1727.
- [30] BRENDDEL M, BRUNNER F, KNIGGE A, et al. AlGaIn-based metal-semiconductor-metal photodetectors with high external quantum efficiency at low operating voltage [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10104: 101040J–1–101040J–9.
- [31] QIAN Z Y, RAJARAM V, KANG S, et al. NEMS infrared detectors based on high quality factor 50 nm thick AlN nano-plate resonators [C] // *Proceedings of Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium*. Besancon, France, 2017: 500–501.

- [32] 沈悦, 徐宇豪, 张宗坤, 等. CdZnTe 薄膜和 AlN/CdZnTe 基紫外光探测器制备方法及应用技术 CN108258081A [P/OL]. 2018-07-06. [2018-10-11]. http://www.jigao616.com/zhuanlijieshao_18401878.aspx.
- [33] ZHENG W, LIN R C, RAN J X, et al. Vacuum-ultraviolet photovoltaic detector [J]. ACS Nano, 2018, 12 (1): 425-431.
- [34] GAO J N, LIU G R, LI J, et al. Recent developments of film bulk acoustic resonators [J]. Functional Materials Letters, 2016, 9 (3): 1630002-1-1630002-10.
- [35] LIANG J, ZHANG H X, ZHANG D H, et al. 50 Ω -terminated AlN MEMS filters based on lamb wave resonators [C] // Proceedings of the 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems. Anchorage, AK, USA, 2015: 1973-1976.
- [36] CALAYIR E, XU J L, PILEGGI L, et al. Self-healing narrowband filters via 3D heterogeneous integration of AlN MEMS and CMOS chips [C] // Proceedings of IEEE International Ultrasonics Symposium. Washington, DC, USA, 2017: 1-4.
- [37] SHEALY J B, VETURY R, GIBB S R, et al. Low loss, 3.7 GHz wideband BAW filters, using high power single crystal AlN-on-SiC resonators [C] // Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Honolulu, HI, USA, 2017: 1476-1479.
- [38] TSARIK K A, NEVOLIN V K, LAVRENTIEV K K, et al. AlN sensor based on surface acoustic wave with signal amplification by AlN/GaN HEMT [C] // Proceedings of International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies. Kuma-racoi, India, 2015: 718-721.
- [39] BONGRAIN A, ROUSSEAU L, VALBIN L, et al. A new technology of ultrathin AlN piezoelectric sensor for pulse wave measurement [J]. Procedia Engineering, 2015, 120: 459-463.
- [40] BAO Z, HARA M, KUWANO H. Highly sensitive strain sensors using surface acoustic wave on aluminum nitride thin film for wireless sensor networks [C] // Proceedings of the 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems. Anchorage, AK, USA, 2015: 1239-1242.
- [41] YENUGANTI S, GANDHI U, MANGALANATHAN U. Piezoelectric micro resonant pressure sensor using aluminum nitride [J]. Journal of Micro/Nanolithography MEMS and MOEMS, 2017, 16 (2): 025001-1-025001-10.
- [42] FU S L, LI Q, GAO S, et al. Quality-enhanced AlN epitaxial films grown on *c*-sapphire using ZnO buffer layer for SAW applications [J]. Applied Surface Science, 2017, 402: 392-399.
- [43] ABDELMEJEED M, KUO J C, LAL A. A CMOS compatible GHz ultrasonic pulse phase shift based temperature sensor [C] // Proceedings of IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) Conference. Belfast, UK, 2018: 1108-1111.
- [44] KABIR M, KAZARI H, OZEVIN D. Piezoelectric MEMS acoustic emission sensors [J]. Sensors and Actuators: A, 2018, 279: 53-64.
- [45] HOU Y H, ZHANG M, HAN G W, et al. A review: aluminum nitride MEMS contour-mode resonator [J]. Journal of Semiconductors, 2016, 37 (10): 101001-1-101001-9.
- [46] CASSELLA C, PIAZZA G. AlN two-dimensional-mode resonators for ultra-high frequency applications [J]. IEEE Electron Device Letters, 2015, 36 (11): 1192-1194.
- [47] LI C, LIU X Z, SHU L, et al. AlN-based surface acoustic wave resonators for temperature sensing applications [J]. Materials Express, 2015, 5 (4): 367-370.
- [48] HENRY M D, TIMON R P, YOUNG T R, et al. AlN and ScAlN contour mode resonators for RF filters [J]. ECS Transactions, 2017, 77 (6): 23-32.
- [49] WANG W Z, LIANG J, RUAN Y, et al. Design and fabrication of an surface acoustic wave resonator based on AlN/4H-SiC material for harsh environments [J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2017, 18 (1): 67-74.
- [50] WANG N, ZHU Y, SUN C L, et al. High-band AlN based RF-MEMS resonator for TSV integration [C] // Proceedings of the 67th Electronic Components and Technology Conference. Orlando, FL, USA, 2017: 1868-1873.
- [51] YANG S, AI Y J, ZHANG Y, et al. Impact of device parameters on performance of one-port type SAW resonators on AlN/sapphire [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2018, 28 (8): 1-7.
- [52] KAPLAR R, ALLERMAN A A, ARM STRONG A, et al. Generation-after-next power electronics using ultra-wide-bandgap semiconductors [C] // Proceedings of Proposed for Presentation at the Government Microcircuit Applications and Critical Technology Conference. Orlando, FL, USA, 2016: 1-3.

(下转第 256 页)

- [4] WYGANT I O , ZHUANG X F , YE H D T , et al. Integration of 2D CMUT arrays with front-end electronics for volumetric ultrasound imaging [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics , Ferroelectrics , and Frequency Control , 2008 , 55 (2) : 327-342.
- [5] HUANG X W , CHEONG J H , CHA H K , et al. A high-frequency transimpedance amplifier for CMOS integrated 2D CMUT array towards 3D ultrasound imaging [C] // Proceedings of the 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology. Osaka , Japan , 2013: 101-104.
- [6] CICEK I , BOZKURT A , KARAMAN M. Design of a front-end integrated circuit for 3D acoustic imaging using 2D CMUT arrays [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics , Ferroelectrics , and Frequency Control , 2005 , 52 (12) : 2235-2241.
- [7] BOSE S , MANDAL P. A fully differential amplifier with CMOS feedback biasing for sensing CMUT signals [C] // Proceedings of the IEEE Students' Technology Symposium. Kharagpur , India , 2014: 159-163.
- [8] 赵蕾, 张文栋, 何常德, 等. 电容式微机械超声换能器的信号调理电路设计 [J]. 电测与仪表, 2017, 54 (7) : 122-128.
- ZHAO L , ZHANG W D , HE C D , et al. Design of a signal processing circuit of capacitive micromachined ultrasonic transducer [J]. Electrical Measurement & Instrumentation , 2017 , 54 (7) : 122-128 (in Chinese).
- [9] CALLANO G , MATRONE G , SAVOIA A S. Biasing of capacitive micromachined ultrasonic transducers [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics , Ferroelectrics , and Frequency Control , 2017: 64 (2) : 402-413.
- [10] MOMENI O , HASHEMI H , AFSHARI E. A 10-Gb/s inductorless transimpedance amplifier [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems: II , 2010 , 57 (12) : 926-930.
- [11] RAZAVI B. 模拟 CMOS 集成电路设计 [M]. 陈贵灿, 程军, 张瑞智, 等译. 1 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2003: 276-279.
- [12] MALLYA S , NEVIN J H. Design procedures for a fully differential folded-cascode CMOS operational amplifier [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits , 1989 , 24 (6) : 1737-1740.
- [13] SHARMA S , YTTERDAL T. Low noise front-end amplifier design for medical ultrasound imaging applications [C] // Proceedings of the 20th IEEE-IFIP International Conference on VLSI and System-on-Chip. Santa Cruz , CA , USA , 2012: 12-16.
- (收稿日期: 2018-11-27)



作者简介:

杜以恒 (1992—), 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 研究方向为模拟集成电路设计;

张文栋 (1962—), 男, 河南太康人, 博士, 教授, 研究方向为动态测试技术与智能仪器、微电子机械系统 (MEMS) 等。

(上接第 250 页)

- [53] KAPLAR R J , ALLERMAN A A , ARMSTRONG A M , et al. Review—ultra-wide-bandgap AlGaIn power electronic devices [J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology , 2017 , 6 (2) : Q3061-Q3066.
- [54] SARKAR B , REDDY P , KAESS F , et al. Material considerations for the development of III-nitride power devices [J]. ECS Transactions , 2017 , 80 (7) : 29-36.
- [55] NOGAWA H , HIRAO A , NISHIMURA Y , et al. High power IGBT module with new AlN substrate [C] // Proceedings of International Exhibition and Conference for Power Electronics , Intelligent Motion , Renewable Energy and Energy Management. Uremberg , Germany , 2016: 1001-1008.
- [56] MOENCH S , COSTA M S , BARNER A , et al. High thermal conductance AlN power module with hybrid integrated gate drivers and SiC trench MOSFETs for 2 kW single-phase PV inverter [C] // Proceedings of European Conference on Power Electronics & Applications. Karlsruhe , Germany , 2016: 1-8.
- [57] YANG S , LEI L , YU K , et al. Novel vertical GaN power devices using PEALD-AlN/GaN heterostructure [C] // Proceedings of the 13th China International Forum on Solid State Lighting: International Forum on Wide Bandgap Semiconductors. Beijing , China , 2016: 93-96.
- (收稿日期: 2018-11-21)



作者简介:

何君 (1969—), 女, 河北石家庄人, 副教授, 长期从事信息技术情报研究工作。