III 族氮化物 InAlN 半导体异质结研究进展

郝跃*, 薛军帅, 张进成

西安电子科技大学微电子学院, 宽禁带半导体材料与器件重点实验室, 西安 710071

* 通信作者. E-mail: yhao@xidian.edu.cn

收稿日期: 2012-10-10; 接受日期: 2012-10-30

摘要 由于高频大功率固态微波功率电子器件有明显的應用前景, 在过去二十年氮化镓 (GaN) 基高电子迁移率晶体管 (HEMT) 得到广泛研究, 取得了一系列进展, 并开始走向商业化. 为了进一步提高器件性能, 尤其是高工作频率和高电压下器件工作的可靠性, 新材料、新工艺以及新器件被不断提出, 其中基于 InAlN 材料的晶格匹配无应变异质结凭借优越材料性能成为新一代 GaN 基 HEMT 材料. 本文结合在 III 族化合物半导体材料和器件领域的相关工作, 对 InAlN 基异质结半导体材料生长进展做简要综述. 在分析 InAlN 基异质结外延生长的基础上, 对我们提出的脉冲式 (表面反应增强) 金属有机物化学气相淀积 (MOCVD) 外延 InAlN/GaN 异质结技术优势和外延材料结果进行了讨论.

关键词 化合物半导体 高电子迁移率晶体管 InAlN/GaN 异质结 晶格匹配无应变 脉冲式金属有机物化学气相淀积

1 引言

继硅和砷化镓、磷化铟半导体材料之后, 以 GaN 和 SiC 为代表的第三代宽禁带半导体材料和器件, 在过去二十年成为国内外固态微波功率器件领域的研究热点, 并得到了高速发展, 尤其是 GaN 基 HEMT 器件具有大的禁带宽度、高的击穿电场强度、高饱和电子速度等优越性能, 能在高频波段输出大的功率密度, 非常适合制造高温、高压、高频微波、大功率开关等电子器件, 在卫星、无线通信基站、雷达探测、汽车电子、电力传输和单片微波集成电路 (MMICs) 等国民经济和国防建设中有着广泛应用 (如图 1 所示).

表 1 给出了几种常用半导体材料的基本材料参数, 可以看出 GaN 和 SiC 有着显著的品质因数, 尤其 GaN 有高的电子饱和速度能提高工作频率, 宽的禁带能承受高的击穿电压, 满足了高频大功率微波器件工作时对速度和电压的要求, 并且 GaN 可以外延在高热导率的 SiC 衬底上. 此外, GaN 基器件抗辐照能力强, 噪声系数低, 具有好的温度稳定性, 能在高温等恶劣环境工作. 重要的是 GaN 可以形成 AlGaIn/GaN 异质结, 能产生高面密度和高迁移率的二维电子气 (2DEG), AlGaIn/GaN 异质结基 HEMT 能应用于工作频率从微波到毫米波的器件. 因此, GaN 基电子器件的研究和发展备受关注.

引用格式: 郝跃, 薛军帅, 张进成. III 族氮化物 InAlN 半导体异质结研究进展. 中国科学: 信息科学, 2012, 42: 1577–1587, doi: 10.1360/112012-579

图 1 GaN 基电子器件的广泛应用

Figure 1 Extensive application of GaN-based electronic devices

表 1 几种重要半导体材料的材料参数

Table 1 Material parameters of several key semiconductors

Semiconductors	Si	GaAs	InP	4H-SiC	GaN	Diamond
Bandgap (eV)	1.12	1.43	1.34	3.2	3.4	5.6
Relative dielectric constant	11.9	12.5	12.5	10	9.5	5.5
Critical breakdown filed (MV/cm)	0.3	0.4	0.45	3.5	3.3	5
Saturated electron velocity (10^7 cm/s)	1.0	1.0	1.0	2.0	2.5	2.7
Electron mobility (cm^2/Vs)	1500	8500	5400	700	900	1900
Thermal conductivity (W/cm-K)	1.5	0.54	0.67	4	1.3	20
Johnson Figure-of-Merit (JFOM)*	1.0	11	13	410	790	5330
Baliga Figure-of-Merit (BHFM)*	1.0	16	6.6	34	100	1080

*all values of JFOM and BHFM are normalized with respect to Si.

2004 年, Wu 等^[1] 通过对器件场板结构的优化, 在 8 GHz 的频率下得到了 AlGaIn/GaN 器件 30.6 W/mm 的输出功率密度和 49.6% 的功率附加效率; 2009 年, Chu 等^[2] 采用 AlGaIn 缓冲层制备的 V 型栅 HEMT 器件, 在 4 GHz 的频率下得到 13.1 W/mm 的输出功率密度和 72% 的功率附加效率; 2010 年, Feng 等^[3] 采用氟离子注入技术制造了阈值电压为 +0.2 V 的增强性 HEMT, 在 18 GHz 的频率下, 最大输出功率密度为 3.65 W/mm, 功率附件效率为 42%, 增益为 11.6 dB. 可见, AlGaIn/GaN HEMT 器件在 C , X 和 Ku 波段表现出了很好的功率特性. 随着材料外延技术的提高, GaN 基 HEMT 器件的研究从 c 面 Ga 极性转向非极性面和 N 极性. 2008 年, Wong 等^[4] 制造了栅长为 0.7 μm 的 N 极性 HEMT 器件, 在 4 GHz 频率下得到 7.1 W/mm 的输出功率密度, 58% 的功率附加效率, 其电流增益和功率增益截止频率分别为 17 和 37 GHz; Kuroda 等^[5] 在 r 面蓝宝石衬底上制备了非极性 a 面 AlGaIn/GaN HEMT 器件, 得到了 +1.3 V 的阈值电压和 112 mA/mm 的漏极输出电流密度. 为了满足日益增加的各种性能需求, GaN HEMT 器件从平面二维结构向立体三维结构发展, 将成为下一代 HEMT 器件的基本结构. 最近, Lu 等^[6] 研究了三维栅结构 GaN 金属绝缘体半导体场效应晶体管 (MISFET), 实现了 565 V 的击穿电压和增强型工作模式; 同时, 垂直真空沟道 MOSFET 在试验上得到验证, 在这种结构中载流子在真空中实现了弹道运输模式, 减少了电场引起的各种散射, 提高了器件工作频率^[7]. 图 2 为三维栅和真空沟道 FET 的结构示意图.

图 2 (a), (b) 和 (c) 分别为栅电极淀积之前的三维栅表面 SEM 形貌, 表面 AFM 形貌和横截面 SEM 形貌^[6]; (d) 淀积栅电极后的常关型 GaN MISFET 表面 SEM 形貌; (e) 为图 (d) 中虚线框所示的常关型沟道区结构示意图; (f) 覆盖了镓滴电极的真空沟道 MISFET 结构示意图^[7]

Figure 2 (a) Top-view SEM image; (b) top-view AFM image; (c) cross-section SEM image of tri-gate structure before deposition of gate electrode^[6]; (d) top-view SEM image of tri-gate normally-off GaN MISFET after the deposition of gate electrode; (e) schematic of the normally-off channel region in the dashed-line-square area in (d); (f) schematic of vacuum channel MISFET covered with a gallium droplet electrode^[7]

2 InAlN/GaN 异质结的优势

在过去近二十年研究中, GaN 基固态微波功率器件的研究都是基于 AlGaIn/GaN 异质结材料. 在 AlGaIn/GaN 异质结中, AlGaIn 势垒层和 GaN 沟道之间存在晶格失配而使 AlGaIn 势垒层受到张应变, 依靠这种张应变诱发额外的压电极化, 同时 AlGaIn 材料中存在自发极化, 在压电极化和自发极化共同作用下 AlGaIn/GaN 界面产生高密度的二维电子气 (2DEG). 通常, 采用增加 AlGaIn 势垒层 Al 组分的方式来提高 2DEG 面密度, 因为 Al 组分增加会增加导电断续, 增强自发极化和压电极化效应, 从而提高 2DEG 面密度并实现大功率的电子器件. 然而, AlGaIn 势垒层始终受到 GaN 基板的应变, Al 组分增加伴随着晶格失配的加大, AlGaIn 势垒层受到 GaN 的张应变会增加, 其临界弛豫厚度迅速降低. 当势垒层厚度超过临界厚度时会发生塑性应变弛豫, 产生失配位错和裂纹等缺陷而降低势垒层质量, 恶化异质结的界面质量, 增加界面粗糙度和合金无序散射, 最终降低 2DEG 迁移率. 更为重要的是, 由于 AlGaIn 势垒层和 GaN 沟道是具有很强压电极化效应的材料, 基于 AlGaIn/GaN 异质结的 HEMT 器件工作时, 在靠近漏极的栅下方存在大的电场, 在 AlGaIn 势垒层的很小区域内产生大的应力. 加之大的晶格失配, 处于应变状态的 AlGaIn 势垒层, 在 HEMT 器件工作时会发生逆压电效应, 在其内部形成晶体缺陷, 这些缺陷严重影响器件的工作性能和可靠性, 尤其是 HEMT 器件处在长时间高温高压工作状态.

为了解决势垒层应变而引起的问题, InAlN 三元合金代替常规 AlGaIn 势垒层是最好的途径. 依赖与 In 组分的变化, InAlN 合金的禁带宽度可以在 0.7~6.2 eV 之间变化, 并且和 GaN 之间能形成 c 面内 a 轴晶格常数的匹配. 图 3 为 III 族氮化物半导体材料的禁带宽度和 a 轴晶格常数的变化, 包含了考虑禁带宽度弯曲系数的情况, 可以看出唯独 InAlN 能和 GaN 实现晶格匹配. 晶格匹配 InAlN/GaN 异质结中, InAlN 势垒层处于无应变状态, 有效消除了应变相关的逆压电效应和可靠性问题. 和常规

图 3 氮化物禁带宽度与 a 轴晶格常数的关系Figure 3 Bandgap of nitrides versus a -axis lattice constant

AlGaIn/GaN 异质结相比较, 即使不存在压电极化, InAlN 势垒层和 GaN 基板之间的自发极化差值和导带断续远大于常规 AlGaIn/GaN 异质结, 理论计算结果预测其 2DEG 面密度高达 $2.7 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, 远高于 AlGaIn/GaN 异质结中 $1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 的面密度。

InAlN 合金材料给氮化物异质结和器件的设计带来了更多的选择和自由度, 给器件性能的进一步提高提供了机会, 极大的拓展了研究范围, 解决了基于常规 AlGaIn 和 InGaIn 三元合金的器件问题, 可以实现诸多理论预测和拓展氮化物器件的应用空间。依赖于 In 组分的变化, InAlN 分别可以形成 InAlN/AlGaIn、InAlN/GaN 和 InAlN/InGaIn 等不同沟道材料的晶格匹配异质结构, 满足不同的应用需求。其中 InAlN/AlGaIn 异质结向更高 Al 组分靠近, 禁带宽度进一步增加, 能承受更高的击穿电压, 适合于制备高压功率开关器件; 而 InAlN/InGaIn 异质结利用迁移率更高的窄禁带 InGaIn 作为沟道材料, 可以进一步提高异质结中 2DEG 的迁移率和载流子限域性。图 3 表明, 在晶格匹配 InAlN/GaN 的直线上, 通过改变 $\text{In}_{0.17x}\text{Al}_{0.83x}\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 四元合金的组分, 可以实现晶格匹配的无应变 $\text{In}_{0.17x}\text{Al}_{0.83x}\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结。在这种结构中, 可以在保证晶格匹配的条件下单独实现禁带宽度的自由设计, 从而获得不同极化强度的异质结材料。

3 InAlN 及其异质结材料外延技术的挑战

与 AlGaIn, InGaIn 等三元氮化物材料相比较, InAlN 材料外延最难的是获得高质量, 因此 InAlN 材料和器件的相关的研究报道也比较少。图 4 为 Web of Science 的统计结果。

获得高质量的 InAlN 材料是困难的, 其原因首先是构成 InAlN 材料的两种二元材料 (AlN 和 InN) 在性能上存在巨大差异。AlN 和 InN 在 a 轴和 c 轴的晶格常数失配高达 13.5% 和 12.5%, 使得 InAlN 材料内部存在大的应变。第一性原理的计算结果表明, InAlN 合金在一定的组分范围内表现出不稳定性, 是一种不易混溶的合金材料, 在其内部有明显的相不混溶间隙, 常表现为相分离、组分波动和分布不一致等现象。组分分布不一致还与 In-N (1.98 eV) 和 Al-N (2.88 eV) 之间化学键能和电离度的巨大

图 4 III 族氮化物半导体材料与器件研究发表论文统计

Figure 4 Record counts of publications per year for group-III nitride materials and devices

差异有关,除了出现在和生长方向相一致的纵向上外,在薄膜表面横向上也会出现. 研究表明, GaN 基板上外延 InAlN 材料的热学稳定性和其组分密切相关. 当和 GaN 基板接近晶格匹配的组分时,在高达 960°C 的退火温度下仍旧可以长时间保持稳定;而和 GaN 基板非晶格匹配时, InAlN 材料在高温退火时会出现弛豫部分,同时伴随 In 元素的重新分布和损失 [8].

其次, AlN 和 InN 最优外延生长条件的差异. 高质量的 InN 材料,常在相对较低的外延温度 (600°C)、较高的氨气分压和反应室压强下获得;而超过 1100°C 的高温、以及低的氨气流量和反应室压强等条件更加有利于 AlN 材料的外延. 因此,最优外延条件的不一致,不利于 In 元素有效地结合到 InAlN 晶格体系中,而 Al 元素结合却有很强的倾向. 实际外延中,必须对温度、压强、V/III 比等多种影响参数必须做出平衡和兼顾,找到能同时满足两种二元材料生长的最佳外延条件. 这也对外延设备的性能以及测量控制技术提出了要求,因为反应室的几何构造和参数影响着气流流速和分布,温度和气体流量的准确测量和控制是试验重复性指标的重要保证.

最后,与 Al 源有关的气相预反应. MOCVD 外延氮化物材料时, III 族和 V 族源在气相中会发生寄生预反应. InAlN 常作为高铝组分材料应用,其 MOCVD 外延生长时需要足够的 NH_3 和铝源流量来提高生长速率. 由于三乙基铝 (TEAl) 蒸气压极低,三甲基铝 (TMAI) 仍旧是目前最方便和广泛采用的铝源前躯体. 然而 TMAI 有很强的化学活性,在气相中与 NH_3 很容易产生无法有效控制的寄生预反应. 在 InAlN 薄膜 MOCVD 外延时, TMAI 和 NH_3 之间的预反应远强于 TMIIn 和 NH_3 之间的. 与 Al 源有关的气相预反应是一系列化学反应的叠加,会产生大分子量表面扩散能力极低的铝络合物 [9]. 其中一部分在经过高温的薄膜生长表面时发生分解,对薄膜的生长没有影响. 而有的络合物会在薄膜上方的气流中形成不易分解的聚合物和纳米微粒,这些纳米微粒会和尾气一起被抽走,导致 MO 源的消耗和薄膜生长效率的降低,抑制了 Al 元素在薄膜中的结合. 有的微粒会结合到薄膜中而引入碳和氧等杂质元素. 由于气相预反应的发生, Al 原子在薄膜生长表面的平均自由程大大降低, InAlN 薄膜会以三维模式进行成核生长,引起薄膜质量的退化.

以上这些因素的共同作用,对高质量 InAlN 薄膜及其异质结构的外延提出了技术上的挑战,常在薄膜表面出现组分波动和分布不均. 图 5 为 InAlN 薄膜的两种典型表面 TEM 形貌 [10,11]. 图 5(a) 为蜂窝状表面,图 5(b) 为柱状形貌,图中不同的颜色代表不同的薄膜组分. 除此之外,钨滴、裂纹、丘状

图 5 InAlN 薄膜表面 TEM 形貌图 (直线示意了组分波动)^[10,11]

Figure 5 Surface morphology of InAlN films observed by TEM. (a) Honeycomb structure^[10]; (b) columnar microstructure^[11]. The lines show the composition fluctuation

凸起也是 InAlN 材料常见的表面缺陷.

4 InAlN 及其异质结的研究进展

为了实现 InAlN 材料在高频大功率器件方面的应用,国际上相关研究小组进行了大量工作,采用了不同的外延方法和衬底材料以期获得高质量的 InAlN/GaN 异质结材料.为进一步扩大应用领域和实现各种性能的理论预测,人们尝试外延非极性、半极性面和 N-Polar 面 InAlN 及其异质结构,并取得了满意的结果.尤其自 2006 年开始,有关 InAlN/GaN 异质结的外延在技术获得了突破,相关材料和器件各种特性的研究才广泛开展,并在短时间内取得了飞速的进展,验证了之前的各种理论预测.这一系列研究也进一步加深了对 InAlN 材料及其结构特性的认识和理解,给相关应用提供了信息反馈和理论指导.

1999 年, Kariya 等^[12] 首次尝试用 MOCVD 外延 $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}$ 材料, 并发现 InAlN 的结晶质量强烈的依赖与 GaN 基板的质量. 由于温度、压强、TMAI/TMIn、氨气流量、V/III 比、载气流量等参数直接影响 MOCVD 外延 InAlN 薄膜的组分、表面形貌和结晶质量. 通过对这些参数的大量试验优化, 人们掌握了 In 元素的结合系数, 能够对其自由调控而获得富 Al、富 In 的 InAlN 材料. Hums 等^[13] 成功实现了 In 组分在 9%~100% 范围内可以调控的 InAlN 薄膜. Lobanova 等^[14] 对 MOCVD 外延 InAlN 薄膜进行了系统研究, 建立了完备的生长模型, 解释了气相中和表面的化学反应. 2001, Yamaguchi 等^[15] 利用 5 个周期的 $\text{In}_{0.1}\text{Al}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ (1 nm/4 nm) 超晶格代替 InAlN 势垒层, 获得了 2DEG 迁移率和面密度分别为 $946 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 和 $2.9 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 的异质结. Hiroki 等^[16] 得到了 2DEG 迁移率和面密度分别为 $1200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 和 $1.1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 的近晶格匹配 InAlN/GaN 异质结. Gonschorek^[17] 和 Miyoshi^[18] 分别所在的研究小组相继取得了相似的成果, 把近晶格匹配 InAlN/AlN/GaN 异质结的 2DEG 面密度提高到 $2.6 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, 迁移率并没有发生严重的退化 ($1170 \text{ cm}^2/\text{Vs}$). Xie 等^[19] 以牺牲 2DEG 面密度 ($1.24 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$) 的方式, 把 2DEG 迁移率提高到 $1410 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Tülek 等^[20] 外延的近晶格匹配 InAlN/AlN/GaN 异质结, 以高达 $4.23 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 和低至 $182 \Omega/\square$ 的方块电阻在 InAlN 基异质结外延中刷新了记录, 但 2DEG 迁移率仅为 $812 \text{ cm}^2/\text{Vs}$.

作为近三年兴起的研究热点, N-Polar 氮化物半导体材料和器件得到了广泛关注. N-Polar 材料在

图 6 InAlN/GaN 异质结的 PMOCVD 生长脉冲示意图

Figure 6 Schematic diagram of PMOCVD pulses for InAlN/GaN heterostructures

HEMT 器件中可以实现极低的欧姆接触电阻, 能作为天然的背势垒抑制器件尺寸等比例缩小时出现的短沟道效应. Mishra 研究小组相继用 MOCVD 和 PA-MBE 法分别在斜切蓝宝石衬底和 SiC 衬底上外延得到 N-Polar 的 InAlN 材料, 对其各向异性的材料特性进行了研究, 为其在 N-Polar 高频大功率器件中的应用做出了初步的探索 [21,22].

5 脉冲式金属有机物化学气相淀积技术优势

我们提出了一种新的表面反应增强的 MOCVD (脉冲 MOCVD, PMOCVD) 方法, 可以实现高质量的 InAlN 及其异质结构材料生长 [23~27]. 图 6 是 InAlN/GaN 异质结势垒层 PMOCVD 生长的脉冲示意图, 在微观上以淀积超薄 AlN/InN 超晶格的方式得到 InAlN 材料. V 族源和 III 族源以相间隔交替的方式通入反应室, 减少了 TMAI 和 NH₃ 之间的接触机会, 避免了与 Al 相关的预反应, 也满足了 AlN 生长所需的低 V/III 比要求. 考虑到大的分子量和脉冲宽度, TMIn 和 NH₃ 脉冲也采取分离的方式, 以期增强 In 吸附原子在薄膜生长表面的迁移率和 In 元素的结合效率. 在一个脉冲循环周期中, 包含脉冲宽度分别为 6 s 的 TMAI 和 NH₃ 脉冲, 以及 24 s 的 TMIn 脉冲, MO 源和 NH₃ 脉冲以相间隔交替的方式通入反应室, 并且 NH₃ 脉冲跟在 MO 源脉冲之后. 由于脉冲循环次数、脉冲宽度和脉冲个数能够灵活调控和设计, 因此这种方法实现了 InAlN 材料组分和厚度的精确控制.

在氮化物材料外延中, V 族和 III 族原子在到达衬底上方淀积薄膜的关键反应区域之前会发生预反应, 在衬底上方既有彼此反应形成 III-N 键的化学过程, 也有各自在材料表面横向迁移、吸附和解吸附的物理过程. 尤其是与 Al 源相关的气相预反应, 其反应生成的寄生络合物会落在外延薄膜表面, 在薄膜表面形成缺陷而恶化结晶质量. 常规连续式 MOCVD 外延氮化物材料时, V 族和 III 族反应源即 NH₃ 和 MO 源, 是同时、连续地通入反应室的, 气相预反应是不可避免的. 削弱预反应的措施通常是通过反应室的特殊设计实现气路分离, 即空间上将反应气体分开输运直到衬底上方再混合反应. 这样的反应室通常结构较复杂, 清洗和维护的成本较高. 而 PMOCVD 方法是采用脉冲分时输运方式, 将 V 族和 III 族反应源在不同的时间单独通入反应室的 MOCVD 生长方法, 不需要复杂的分离气路就能够有效地抑制预反应. PMOCVD 的分时输运方式一方面减少了不同的反应物在到达衬底之前接触而

图 7 PMOCVD 外延成果与报道的 InAlN/GaN 异质结室温输运特性比较

Figure 7 Comparison of room-temperature transport properties of InAlN/GaN heterostructures grown by PMOCVD and other groups

发生预反应的机会, 减少了预反应产物淀积引起的材料缺陷, 另一方面 MO 源中金属原子在薄膜生长表面的横向迁移率增加, 在与 N 原子反应成键之前能到达生长面上能量最有利的格点, 如台阶的扭折或晶体缺陷处, 因此原子结合到晶体中时得以规则的排列, 有利于增强二维表面覆盖, 获得原子级光滑表面, 并提高结晶质量. 这种表面反应的增强能够显著降低材料的外延生长温度, 对于减小大尺寸外延片由于高温生长引起的衬底弯曲具有重要的意义, 是衬底温度和外延层组分分布更加一致, 尤其是对含 In 化合物材料的外延生长. 在工艺控制上, PMOCVD 方法将单个外延层的生长过程分为重复的脉冲周期单元, 可以在每个单元内对不同反应源分别设置脉冲方式和组合, 主要是脉冲宽度、脉冲个数、脉冲间隔和叠加时间. 这种生长方式本身增加了工艺控制的自由度和精确度, 通过调整脉冲宽度和个数、脉冲的间隔和叠加时间等参数来控制反应源流量和 V/III 比, 能够实现单原子层级 (0.1 nm) 的材料生长厚度精确控制.

除了 InAlN 材料中本身热力学不混溶间隙引起的组分分布不均和晶相分离等现象外, 温度和 V/III 比是 InAlN 材料外延时最主要的矛盾. 为了抑制 TMAI 和 NH_3 之间气相预反应的发生, 需要低压和低的 V/III 比; 而 InN 的外延条件正好与之相反, 高压和高的 V/III 比有利于高质量的获得. 为了增

加 In 元素的结合效率, 常降低外延温度; 但温度的降低又会引起 In 相分离, 尤其是在薄膜表面组分出现大的波动, 同时降低吸附原子在薄膜生长表面的迁移率. 因此, InAlN 外延需要在两个极端条件之间做出平衡, 找到能够同时满足两种材料生长的条件, 而 PMOCVD 很好地解决这一难题.

6 PMOCVD 外延 InAlN 材料进展

通过对外延温度、外延压强、脉冲组合、V/III 比以及 TMIn/TMAI 流量比等参数的影响研究和优化, 我们获得了 PMOCVD 外延 InAlN 势垒层的最优条件, 获得了高质量的近晶格匹配 InAlN/GaN 异质结材料. 室温下异质结 2DEG 面密度高达 $2.01 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, 在温度变化中几乎保持不变, 表明了 2DEG 沟道的存在. 2DEG 迁移率在室温为 $1402 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, 由于低温时离化杂质和光学声子散射的抑制, 77 K 下 2DEG 迁移率提高到 $5348 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. 这一结果远高于同样温度下 Gonschorek 等^[17] ($3170 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) 和 Hiroki 等^[16] ($2600 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) 报道的结果. 图 7 对已经报道的结果和 PMOCVD 外延结果进行了对比, 可以看出, 本论文 PMOCVD 外延的 InAlN/GaN 异质结在保证高 2DEG 面密度下获得了高迁移率, 没有以牺牲面密度的方法获得高迁移率, 或者高面密度引起迁移率的严重下降. 在常规的 AlGaIn/GaN 异质结构设计和外延中, 常在 2DEG 面密度和迁移率之间做出取舍, 而往往不能兼顾两者. 同时, PMOCVD 外延的 InAlN/GaN 异质结在输运特性上有很好的 consistency. Leighton 非接触方阻测试结果表明, 在 2 英寸的晶圆片上, 方块电阻最大值和最小值分别为 241 和 231 $\Omega/\square$, 方阻均值和不均匀性分别为 234 $\Omega/\square$ 和 1.22%. 这些都表明了 PMOCVD 在 InAlN/GaN 异质结材料研究效果是显著的.

7 结束语

作为新型的势垒层材料, InAlN 表现出了优于常规 AlGaIn 势垒层的诸多优势, 能进一步提高 GaN 基固态微波功率器件性能, 尤其是在高频毫米波器件应用中. 本文对国际上相关的材料进展进行了综述, 在分析了 InAlN 及其异质结外延技术挑战基础上, 提出了 PMOCVD 外延技术, 并成功获得了具有优越输运特性的高质量近晶格匹配 InAlN/GaN 异质结材料, 并指出了 PMOCVD 的技术优势和应用前景, 为 III 族氮化物材料及其异质结构的外延和研究提供了新的外延途径.

参考文献

- 1 Wu Y F, Saxler A, Moore M, et al. 30 W/mm GaN HEMTs by field plate optimization. *IEEE Electron Dev Lett*, 2004, 25: 117–119
- 2 Chu R M, Chen Z, Pei Y, et al. MOCVD-grown AlGaIn buffer GaN HEMTs with V-gates for microwave power applications. *IEEE Electron Dev Lett*, 2009, 30: 910–912
- 3 Feng Z H, Zhou R, Xie S Y, et al. 18-GHz 3.65W/mm enhancement-mode AlGaIn/GaN HFET using fluorine plasma ion implantation. *IEEE Electron Dev Lett*, 2010, 31: 1386–1388
- 4 Wong M H, Chu R M, Rajan S, et al. N-face metal-insulator-semiconductor high-electron-mobility transistors with AlN back barrier. *IEEE Electron Dev Lett*, 2008, 29: 1101–1103
- 5 Kuroda M, Ueda T, Tanaka T. Nonpolar AlGaIn/GaN metal-insulator-semiconductor heterojunction field-effect transistors with a normally off operation. *IEEE Trans Electron Dev*, 2010, 57: 368–372
- 6 Lu B, Matioli E, Palacios T. Tri-gate normally-off GaN power MISFET. *IEEE Electron Dev Lett*, 2012, 33: 360–362

- 7 Srisophon S, Jung Y S, Kim H K. Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor with a vacuum channel. *Nat Nanotechnol*, 2012, 7: 504–508
- 8 Gadanez A, Bläsing J, Dadgar A, et al. Thermal stability of metal organic vapor epitaxy grown AlInN. *Appl Phys Lett*, 2007, 90: 221906-1–221906-3
- 9 Chen C H, Liu H, Steigerwald D, et al. A study of parasitic reactions between NH_3 and TMGa or TMAI. *J Electron Mater*, 1996, 25: 1004–1008
- 10 Choi S, Wu F, Shivaraman R, et al. Observation of columnar microstructure in lattice-matched InAlN/GaN grown by plasma assisted molecular beam epitaxy. *Appl Phys Lett*, 2012, 100: 232102-1–232102-3
- 11 Zhou L, Smith D J, McCartney M R. Observation of vertical honeycomb structure in InAlN/GaN heterostructures due to lateral phase separation. *Appl Phys Lett*, 2007, 90: 081917-1–081917-3
- 12 Kariya M, Nitta S, Yamaguchi S, et al. Mosaic structure of ternary $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{N}$ films on GaN grown by metalorganic vapor phase epitaxy. *Jpn J Appl Phys*, 1999, 38: L984–L986
- 13 Hums C, Bläsing J, Dadgar A, et al. Metal-organic vapor phase epitaxy and properties of AlInN in the whole compositional range. *Appl Phys Lett*, 2007, 90: 022105-1–022105-3
- 14 Lobanova A V, Segal A S, Yakovlev E V, et al. AlInN MOVPE: growth chemistry and analysis of trends. *J Cryst Growth*, 2012, 352: 199–202
- 15 Yamaguchi S, Kosaki M, Watanabe Y, et al. Crystal growth of high-quality AlInN/GaN superlattices and of crack-free AlN on GaN: their possibility of high electron mobility transistor. *Phys Stat Sol*, 2001, 188: 895–898
- 16 Hiroko M, Yokoyama H, Watanabe N, et al. High-quality InAlN/GaN heterostructures grown by metal-organic vapor deposition phase epitaxy. *Superlattices Microstruct*, 2006, 40: 214–218
- 17 Gonschorek M, Carlin J F, Feltin E, et al. High electron mobility lattice-matched AlInN/GaN field-effect transistor heterostructures. *Appl Phys Lett*, 2006, 89: 062106-1–062106-3
- 18 Miyoshi M, Kuraoka Y, Tanaka M, et al. Metalorganic chemical vapor deposition and material characterization of lattice-matched InAlN/GaN two-dimensional electron gas heterostructures. *Appl Phys Express*, 2008, 1: 081102-1–081102-3
- 19 Xie J Q, Ni X F, Wu M, et al. High electron mobility in nearly lattice-matched AlInN/AlN/GaN heterostructure field effect transistors. *Appl Phys Lett*, 2007, 91: 132116-1–132116-3
- 20 Tülek R, Ilgaz A, Gökden S, et al. Comparison of the transport properties of high quality AlGaIn/AlN/GaN and AlInN/AlN/GaN two-dimensional electron gas heterostructures. *J Appl Phys*, 2009, 105: 013707-1–013707-6
- 21 Dasgupta S, Nidhi, Choi S, et al. Growth, structural, and electrical characterization of N-polar InAlN by plasma-assisted molecular beam epitaxy. *Appl Phys Express*, 2011, 4: 045502-1–045502-3
- 22 Brown D F, Keller S, Mates T E, et al. Growth and characterization of In-polar and N-polar InAlN by metal organic chemical vapor deposition. *J Appl Phys*, 2010, 107: 033509-1–033509-7
- 23 Xue J S, Zhang J C, Zhang K, et al. Fabrication and characterization of InAlN/GaN-based double-channel high electron mobility transistors for electronic applications. *J Appl Phys*, 2012, 111: 114513-1–114513-5
- 24 Xue J S, Zhang J C, Zhang W, et al. Effects of AlN interlayer on the transport properties of nearly lattice-matched InAlN/GaN heterostructures grown on sapphire by pulsed metal organic chemical vapor deposition. *J Cryst Growth*, 2012, 343: 110–114
- 25 Xue J S, Hao Y, Zhou X W, et al. High quality InAlN/GaN heterostructures grown on sapphire by pulsed metal organic chemical vapor deposition. *J Cryst Growth*, 2011, 314: 359–364
- 26 Xue J S, Zhang J C, Hou Y W, et al. Pulsed metal organic chemical vapor deposition of nearly lattice-matched InAlN/GaN/InAlN/GaN double-channel high electron mobility transistors. *Appl Phys Lett*, 2012, 100: 013507-1–013507-3
- 27 Xue J S, Hao Y, Zhang J C, et al. Nearly lattice-matched InAlN/GaN high electron mobility transistors grown on SiC substrate by pulsed metal organic chemical vapor deposition. *Appl Phys Lett*, 2011, 98: 113504-1–113504-3

Research progress in the group-III nitride InAlN semiconductor heterostructures

HAO Yue*, XUE JunShuai & ZHANG JinCheng

Key Laboratory of Wide Band Gap Semiconductor Materials and Devices, School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China

*E-mail: yhao@xidian.edu.cn

Abstract Due to the great potential applications in high-frequency and high-power solid state microwave electronic device, GaN-based high electron mobility transistors (HEMTs) have attracted much attention in the past two decades, and tremendous progress has been achieved toward realizing the commercialization in the market. To further improve the device performance, especially for high operation frequency and device reliability under high voltage, advanced materials and device fabrication process, novel device structures and design are proposed. Among the proposed approaches, InAlN-based lattice-matched heterostructures may become the preferred material for the next HEMT owing to its unique superior material properties. In this paper, in combination with the relative research work in the field of group-III compound semiconductor materials and devices, we present a brief review on the progress in growth of state of the art of InAlN-based heterostructures semiconductor materials. Based on the analysis of epitaxial growth of InAlN-based heterostructures, we discuss the advantages and achievements of proposed pulsed (surface reaction-enhanced) metal organic chemical vapor deposition (MOCVD) for InAlN/GaN heterostructures epitaxy.

Keywords compound semiconductor, high electron mobility transistors, InAlN/GaN heterostructures, lattice-matched, strain-free, pulsed metal organic chemical vapor deposition

Hao Yue received the M.S. degree from Xidian University, Xi'an in 1986, and the Ph.D. degree from Xi'an Jiaotong University in 1991, both in semiconductor devices and microelectronics. He is currently a Professor with the School of Microelectronics, Xidian University, and serves as the Vice President of Xidian University. His current research interests include wide bandgap semiconductor GaN and SiC materials and devices, nanodevices and nanotechnology, semiconductor device reliability physics and failure mechanisms, terahertz semiconductor materials and devices, and organic electronics.

Xue JunShuai received his M.S. degree in microelectronics and solid-state electronics from Xidian University, Xi'an in 2009. He is currently working toward his Ph.D. degree with the State Key Discipline Laboratory of Wide Band Gap Semiconductor Technology, School of Microelectronics, Xidian University. His current research interests focus on epitaxy and fabrication of InAlN-based nitride semiconductor materials and devices, such as heterostructures, high electron mobility transistors, and optoelectronics.

Zhang JinCheng received the M.S. and Ph.D. degrees in microelectronics and solid-state electronics from Xidian University, Xi'an in 2001 and 2004, respectively. Since 2001, he has been with the School of Microelectronics, Xidian University, where he is currently a Professor. He is the holder of more than ten patents. His current research interests include III-V nitride semiconductor materials and devices such as GaN-based high electron mobility transistors.