

УДК 621.375:625.325

М.Ю.Погорельский, (6 курс, каф. ТТЭ), А.Н.Алексеев, к.ф.-м.н.,

ЗАО “Научное и технологическое оборудование”

## НЕМТ НА ДВОЙНОЙ AlGaN/GaN/AlGaN ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ, ВЫРАЩЕННОЙ МЕТОДОМ МВЕ

Сверхвысокочастотные транзисторы на основе широкозонных полупроводников имеют широкую область применения (усилители в сотовой связи, радары на ФАР), в которой потенциал промышленных приборов на основе GaAs исчерпан (не работают без охлаждения, ограничена входная мощность). Основные требования к промышленному СВЧ транзистору – высокие напряжение пробоя и значение крутизны, а также температурная устойчивость (в перспективе – работа в СВЧ режиме без охлаждения) и стойкость к деградации.

Двойные AlGaN/GaN/AlGaN гетероструктуры (ДГС) были выращены в ЗАО “Научное и технологическое оборудование”, С.-Петербург, на установке собственной конструкции, постростовые операции выполнены в ГУП НИИ “Пульсар”, Москва. Экспериментальная установка EPN2 типа RMBE с аммиаком в качестве источника активного азота была разработана для роста структур на основе нитридов III группы. Использование аммиака обеспечивает широкий диапазон соотношения потоков V/III (до 250), необходимый для роста слоев различного состава по Al, но требует специальной оптимизации системы откачки на основе турбомолекулярного насоса и использование hot-lipped источника Ga и cold-lipped источника Al. Для уменьшения площади горячих поверхностей, на которых разлагается аммиак, установлена водяная рубашка нагревателя образца.

Специфика GaN НЕМТ состоит в следующем:

1. зоны во всей структуре наклонены в отсутствие смещения из-за встроенного поля,
2. такой транзистор всегда является нормально открытым,
3. возможно, имеет место диффузия Si во время роста (в стандартной НЕМТ структуре типа затвор/легированный слой/спейсер/канальный слой – в сторону ямы), в результате увеличивается эффективность рассеяния на примесях и захвата на ловушки, связанные с ними, и ухудшается качество интерфейса над каналом,
4. вероятно, одной из причин деградации транзисторов на GaN является движение дефектов и примесей во встроенном поле, особенно при высоких рабочих температурах.

Транзисторные структуры с двумерным каналом выращены на 40-мм подложках Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [0001] и имеют следующие особенности: Ga-face, переходной слой (nucleation layer) AlN, легирование под каналом (back doping), слабо легированный тонкий слой над каналом. Структура состоит из слоев: 250 Å переходной слой AlN, 1 мкм Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>N, 50 Å n<sup>+</sup> Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>N <Si>, 50 Å Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>N спейсер, 500 Å GaN, 100 Å Al<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>N, y=0.1–0.3. Встроенное поле (Ga-face) дает наклон зон барьера AlGaN в сторону слоя GaN и наклон GaN в сторону затвора (канал под интерфейсом).

Переходной слой AlN метастабилен в более широком диапазоне температур роста, чем GaN, и для него легче экспериментально подобрать условия роста, обеспечивающие лучшее качество последующих слоев и избежать утечки под каналом. Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>N также служит для

предотвращения утечки под каналом и одновременно позволяет выполнить легирование под каналом. Известно, что характеристики СВЧ транзистора в режиме высокой мощности резко улучшаются с увеличением концентрации в канале, но уменьшение толщины барьерного слоя, содержащего спейсер, увеличивает крутизну (быстродействие) транзисторов на GaN. В [1] эта проблема для AlGaIn/GaN/AlGaIn HEMT решена применением легирования под каналом.

Одной из основных задач, решение которой необходимо для получения промышленных транзисторов на GaN, особенно транзисторов с квантовой ямой, является оптимизация профиля легирования структуры. В системе AlGaAs/GaAs/AlGaAs QW MISFET (quantum well metal/insulator/inverted interface FET) известны два типа структур: с тонким легированным слоем, расположенным над каналом либо под ним. В [2] рассмотрено влияние профиля легирования такой структуры на сдвиг порога, концентрацию в канале, утечки и степень влияния легирующей примеси на транспорт в канале. Один из основных выводов, сделанных в [2]: легирование верхнего слоя AlGaAs увеличивает утечку через затвор и параллельную проводимость. Таким образом, легирование под каналом предпочтительно.

Были выращены два типа структур, в которых легированный слой находится в 50 Å над слоем GaN или под ним. Нелегированная структура имеет в двумерном канале  $\sigma \sim 1.1-1.7 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$  и подвижность  $\mu \sim 500 \text{ см}^2/\text{В с}$ , структура, легированная Si над каналом до концентрации  $n \sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , что соответствует слоевой концентрации  $n_{\text{sh}} \sim 5 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , имеет  $\sigma \sim 2-2.6 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$  и  $\mu \sim 400 \text{ см}^2/\text{В с}$ , легированная под каналом –  $\sigma \sim 2.5 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$  и  $\mu \sim 500 \text{ см}^2/\text{В с}$ .

Доступная в настоящее время технология нанесения омических контактов требует небольшого легирования барьерного слоя n-типом. Для этого возможно применение структуры со слабым легированием барьера и сильно легированным слоем под КЯ.

Таким образом, предположительно, легирование под каналом должно дать следующие результаты:

1. уменьшение утечки через затвор (вертикальная утечка) и параллельной к каналу проводимости сток–исток (продольная),
2. уменьшение емкости подзатворной области за счет уменьшения заряда над каналом,
3. возможность уменьшения толщины барьерного слоя GaN до предела пробоя затвора,
4. ослабление возможной деградации из-за диффузии Si в КЯ, которая усиливается перегревом и встроенным полем.

Организация "меза" изоляции осуществлялась методом плазмо-химического травления, с маской из фоторезиста. Омические контакты Ti/Al/Pt изготавливались с помощью контактной "взрывной" фотолитографии с последующим отжигом в атмосфере азота. Затвор Ni/Au длиной 0.5-0.6 мкм формировался методом контактной "взрывной" фотолитографии с использованием короткого ультрафиолета. Расстояние между стоком и истоком 3 мкм.

Характеристики приборов полностью соответствуют транзисторным. СВЧ характеристики измерялись на частоте 8.15 ГГц. Крутизна 92–96 мС/мм, напряжение отсечки 6 В, напряжение насыщения 10–12 В, напряжение пробоя до 150 В.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Narihiko Maeda et al. "AlGaIn/GaN Heterostructure Field Effect Transistors with Back-Doping Design for High-Power Applications: High Current Density with High Transconductance Characteristics", Mat.Res.Soc.Symp.Proc. Vol. 743, 2003.

2. R.A. Kiehl, P.M. Solomon, D.J. Frank, "Heterojunction FETS in III-V Compounds", IBM J.Res.Develop. Vol. 34 No. 4 July 1990.