

**Цацульников А.Ф.^{1,2}, Лунди В.В.², Сахаров А.В.²,
Заварин Е.Е.², Усов С.О.¹, Николаев А.Е.²,
Земляков В.Е.⁴, Егоркин В.И.⁴,
Волков В.В.³, Устинов В.М.¹**

¹ИТЦ Микроэлектроники РАН

²Физико-технический институт им. Иоффе РАН

³ЗАО «Светлана-Электронприбор»

⁴Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Технология и оборудование для опытного производства гетероструктур на основе нитрида галлия для СВЧ электроники методом МОС-гидридной эпитаксии

Представлены результаты создания отечественной установки МОС-гидридной эпитаксии гетероструктур на основе InAlGaN и разработки технологии эпитаксиального роста гетероструктур GaN/AlN/AlGaN и GaN/AlN/InAlN на подложках сапфира, кремния и карбида кремния для полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT). Разработана технология in-situ пассивации поверхности гетероструктуры слоем Si₃N₄ для улучшения характеристик HEMT транзисторов. С использованием GaN/AlN/InAlN гетероструктур продемонстрированы HEMT транзисторы с током насыщения до 1600 мА/мм и крутизной до 200 мС/мм.

Ключевые слова: нитрид галлия, гетероструктура, МОС-гидридная эпитаксия, HEMT.

Прогресс в области разработок полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT) на основе системы широкозонных материалов InAlGaN позволил создать элементную базу для усилителей высокой мощности, работающих на высоких частотах в экстремальных условиях [1, 2]. Ключевой технологией получения гетероструктур на основе InAlGaN является на сегодняшний день МОС-гидридная эпитаксия, которая является промышленной используемой технологией в ведущих мировых компаниях, работающих в данной области. Уникальность текущей ситуации на рынке эпитаксиального оборудования в мире состоит в том, что ведущие производители при разработке новых серий установок МОС-гидридной эпитаксии (являющейся основным методом производства эпитаксиальных пластин) учитывают только потребности крупных промышленных компаний, как основных покупателей. Линейка номенклатуры установок эпитаксиального роста является очень узкой, и фактически разработку технологии эпитаксии новых структур и оптимизацию уже существующей технологии необходимо проводить на промышленном оборудовании максимального размера, что могут позволить себе только очень крупные корпорации (OSRAM, CREE, Samsung...). От поколения к поколению с 1995 года постоянно оптимизируется дизайн реакторов, повышается совершенство материала и приборных структур. Увеличиваются как максимальные размеры реакторов в пределах поколения (с 6 до 120 подложек 2"), так и минимальные размеры реакторов в пределах поколения (с 1 подложки 2" до 1 подложки 200 мм). Однако,

для эффективной разработки технологии и организации мелко- и среднесерийного производства (несколько тысяч эпитаксиальных пластин в год), которое, например, характерно для России для вертикально-интегрированных компаний, работающих в области производства СВЧ транзисторов и светодиодов на основе нитрида галлия, необходима разработка и производство семейства МОС-гидридных установок с ограниченным размером реактора. При этом наиболее важно, что данное семейство должно иметь общие принципы функционирования, позволяющих легко переносить технологию.

Группой авторов был разработан российский экспериментальный образец установки МОС-гидридной эпитаксии для опытного производства гетероструктур на основе соединений нитрида галлия (Рис. 1), который позволяет проводить процессы на подложках размером 2”-4”.



Рис. 1. Установка МОС-гидридной эпитаксии опытного производства гетероструктур на основе нитрида галлия.

Разработанная установка имеет следующие характерные особенности. Давление в реакторе изменяется в диапазоне 100 – 1600 мбар, то есть установка позволяет работать при давлении выше атмосферного, что невозможно в коммерчески доступных установках. Установка обладает горизонтальным реактором, металлическим корпусом реактора и индукционным нагревом. Диаметр зоны осаждения составляет 125 мм (3*2” или 1*4”). Установка оснащена собственной системой контроля эпитаксиального процесса, включающей 3 *in-situ* датчика отражения (для контроля скорости роста и кривизны подложки). Используется собственное программное обеспечение.

На данной установке в настоящее время проводится комплекс работ по оптимизации технологии эпитаксиального роста гетероструктур различного типа на подложках сапфира, карбида кремния и кремния. Для традиционных GaN/AlN/AlGaN гетероструктур на подложках сапфира была получена подвижность более 1300 см²/В×с при концентрации в канале 1.6×10¹³ см⁻². Среднеквадратичное отклонение проводимости по подложке составило 1-3%, среднеквадратичное отклонение толщины 3-4% при полной толщине структуры 2.7 микрона. На подложках кремния была достигнута подвижность более 1600 см²/В×с при концентрации в канале 1.2×10¹³ см⁻². На подложках карбида кремния была достигнута подвижность более 2000 см²/В×с при концентрации в канале 1.3-1.4×10¹³ см⁻². Были проведены сравнения свойств транзисторных гетероструктур, выращенных на коммерчески доступных подложках карбида кремния и на подложках карбида кремния,

изготовленных ЗАО «Светлана-Электронприбор». На Рис. 2 приведены карты слоевого сопротивления гетероструктур НЕМТ транзисторов на подложках SiC размером 2 дюйма (коммерческая подложка) и 3 дюйма (отечественная подложка ЗАО «Светлана-Электронприбор»). Как видно из приведенных данных, слоевое сопротивление НЕМТ гетероструктур AlGaN/AlN/GaN составляет 270-300 Ом.кв со среднеквадратичным отклонением 1-2% на подложках карбида кремния как от стороннего коммерческого производителя, так и российского производства, что находится на хорошем современном уровне.

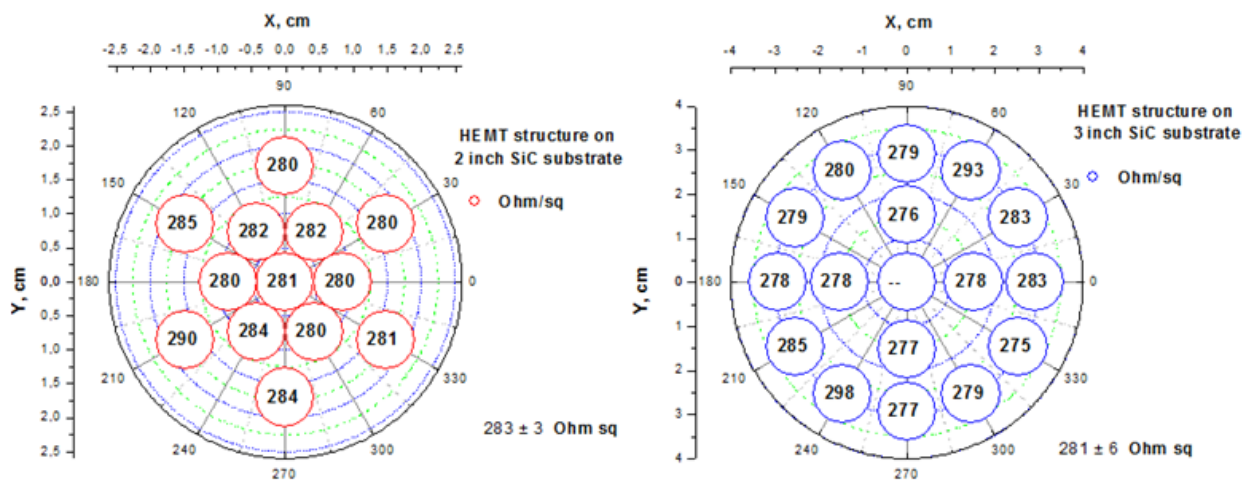


Рис.2 Карты слоевого сопротивления транзисторных структур
 а) коммерчески доступная подложка SiC, размер 2 дюйма, б) подложки ЗАО «Светлана-Электронприбор», размер 3 дюйма

Была разработана технология in-situ (непосредственно в процессе эпитаксиального роста) пассивации поверхности гетероструктуры слоем Si_3N_4 толщиной от 0.5-1 нм до ~100 нм. Показано, что использование Si_3N_4 in-situ пассивации GaN/AlN/AlGaN гетероструктур позволяет улучшить параметры НЕМТ транзисторов. На таких транзисторах на подложках SiC были достигнуты токи насыщения до 800 мА/мм, крутизна 180 мС/мм и выходная мощность 9 Вт на частоте 3 ГГц.

В работе проведены также сравнительные исследования дизайна и технологии эпитаксиального роста гетероструктур InAlN/AlN/GaN и AlGaN/AlN/GaN. Увеличение подвижности и концентрации носителей заряда в НЕМТ гетероструктурах $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ для получения максимальных выходных характеристик требует повышения содержания алюминия x и оптимизации толщины барьерного слоя. Увеличение содержания Al в слое AlGaN вызывает рост упругих напряжений, приводящих к снижению качества получаемого материала, что в свою очередь, ухудшает параметры и уменьшает срок службы транзисторов. В гетероструктурах, в которых вместо AlGaN используется слой InAlN, можно создавать как решеточно-согласованные гетероструктуры со слоями $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{N}$ при $y \approx 0.18$, не содержащие упругих напряжений [3, 4], так и гетероструктуры с управляемыми напряжениями при отклонении содержания индия от данного значения. Изменение составов слоев AlGaN и InAlN позволяет получить слои имеющие растягивающую/сжимающую деформацию, что дает возможность управления концентрацией носителей заряда. К сожалению, МОС-гидридная эпитаксия тройного соединения InAlN сильно затруднена принципиально различными оптимальными условиями роста алюминий- и индий-содержащих нитридов III группы, что приводит к необходимости поиска неочевидных компромиссов при оптимизации технологических

режимов, при этом возможность их нахождения зависит еще и от конструктивных особенностей реактора. Было проведено сравнение условий эпитаксиального роста слоев InAlN и транзисторных гетероструктур InAlN/AlN/GaN на промышленно-ориентированной установке МОС-гидридной эпитаксии AIX2000HT (компания Aixtron, Германия) и разработанной установке Dragon-125. В то время как сильные паразитные реакции в газовой фазе не позволили получить качественные слои в установке AIX2000HT, в установке Dragon-125 были реализованы все принципиальные преимущества горизонтального реактора, такие как стабильность характера протекания газа в широчайшем диапазоне потоков, давлений, и молекулярных масс. Это позволило реализовать успешный рост однородных по площади подложки эпитаксиальных гетероструктур GaN/AlN/InAlN в установке Dragon-125. На Рис. 3 приведена карта слоевого сопротивления InAlN/AlN/GaN гетероструктуры.

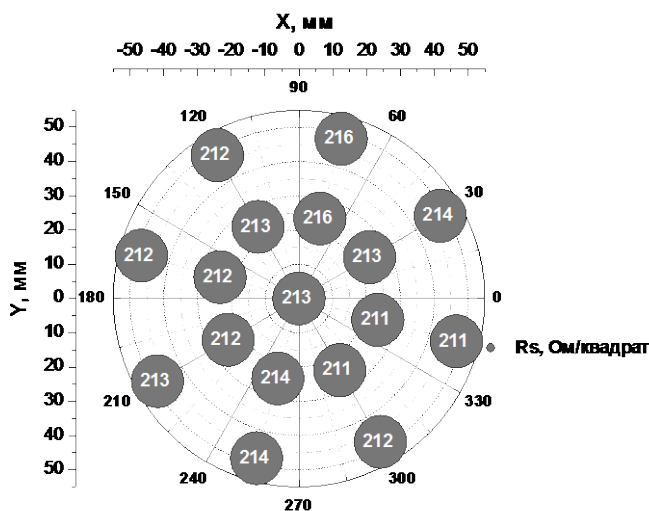


Рис. 3. Карта слоевого сопротивления InAlN/AlN/GaN гетероструктуры НЕМТ, выращенной на сапфировой подложке диаметром 100 мм.

Проведенные исследования позволили реализовать высокие значения концентрации и подвижности носителей в канале InAlN/AlN/GaN гетероструктур, составляющие $2.8\text{--}3.1 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и $750\text{--}850 \text{ см}^2/\text{В} \times \text{сек}$, соответственно. На основе отобранных InAlN/GaN гетероструктур были созданы тестовые полевые транзисторы обладающие высокими токами насыщения 1600 мА/мм и крутизной 200 мС/мм .

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (соглашение о субсидии № 14.607.21.0003 от 05.06.2014, уникальный код проекта: RFMEFI60714X0003).

Библиографический список

1. Мальцев П.П., Федоров Ю.В. Современное состояние и перспективы развития нитридных СВЧ приборов миллиметрового диапазона за рубежом и в России // «Интеграл»: Нанотехнологии и наноматериалы. 2013. - Т. 3. №71. - С. 25-29.
2. Jan Kuzmik. - Power Electronics on InAlN/(In)GaN: Prospect for a Record Performance // Electron Device Letters. 2001. - V. 22. №11. - P. 510-512. DOI: 10.1109/55.962646.
3. M. Neuburger, T. Zimmermann, E. Kohn, A. Dadgar, F. Schulze, A. Krtschil, M. Gunther, H. Witte, J. Blasing, A. Krost, I. Daumiller, M. Kunze. Int. J. Hi. Spe.Ele.Syst. 14, 785 (2004).
4. I. Vurgaftman, J.R. Meyer, L.R. Ram-Mohan. Journ. of Appl. Phys. 89, 5815 (2001).