РАЗДЕЛ VII. НАНОТЕХНОЛОГИИ

Краснов В.В.¹, Миннебаев В.М.^{2,3}, Миннебаев С.В.², Редька Ан.В.²

Исследование GaN НЕМТ при криотемпературах

¹ФИАН им. Лебедева

²АО «НПП «Пульсар»

³МТУ МИРЭА

(Россия, Москва)

doi: 10.18411/gdsn-25-02-2020-10

idsp: scienceconf-25-02-2020-10

Аннотация

В статье представлены результаты исследования дискретных приборов на основе нитрида галлия сантиметрового диапазона длин волн при температуре $T=26$ К для применения в приемных устройствах космических систем и в составе наземных криокомплексов радиоастрономического наблюдения космического пространства.

Ключевые слова: GaN НЕМТ, СВЧ усилитель, малошумящий транзистор, X-диапазон, криотемпература

Введение

В последнее десятилетие в России и мире наблюдается резкий рост интереса к транзисторам на основе структур нитрида галлия – приборы освоены в серийном производстве. Приборы на основе таких структур находят применение в составе СВЧ усилителей систем наземного, морского, бортового и космического базирования, серийно выпускаются и разрабатываются приемо-передающие модули и усилители для радиоэлектронных систем космического применения. Транзисторы и монолитные интегральные схемы, изготовленные по нитрид-галлиевой технологии, по сравнению с аналогами, изготовленными по арсенид-галлиевой технологии, имеют ряд основных преимуществ [1]:

- высокие пробивные напряжения (до 300 В для СВЧ транзисторов и до 1200 В для силовых приборов);
- высокая удельная мощность (до 10 Вт/мм для серийных приборов);
- высокая теплопроводность и рабочие температуры;
- высокая радиационная стойкость и надежность.

Рекордная удельная мощность – одно из основных достижений для приборов на основе GaN обусловлена высокими пробивными напряжениями, что в сочетании с высокой плотностью тока обеспечивает уровень выходной мощности до 10 Ватт на 1 миллиметр ширины затвора, что на порядок выше аналогов на основе арсенида галлия.

Кроме того, структурные особенности подложек на основе гетероструктур нитрида галлия позволяют работать не только с высокими уровнями выходной мощности, но и выдерживать значительные уровни входной мощности (до 5 Вт/мм), что на порядок выше арсенид галлиевых структур [2]. Учитывая это, а также наличие высокого значения коэффициента усиления представляет интерес в применении GaN НЕМТ в составе входных малошумящих усилителей сантиметрового и миллиметрового диапазона частот без использования специальных схем защиты, что в свою очередь позволит получить приемные устройства с низкими значениями коэффициента шума и стойкими к воздействию синхронных и несинхронных помех высокого уровня мощности. Использование подобных устройств особенно важно в радиоэлектронных системах с АФАР [3]. Еще одной областью применения GaN НЕМТ является их

применения в аппаратуре космического базирования, характеризующейся высокими требованиями устойчивости к специальным факторам космического пространства и широким диапазоном рабочих температур, включая низкие температуры криогенных уровней.

Прогресс в развитии ЭКБ на основе нитрида галлия для приемных устройств долгие годы сдерживали как недостатки самих подложек, так и несовершенство выращиваемых на них эпитаксиальных структур. Подложки для эпитаксиального роста слоев нитрида галлия должны иметь минимальное расхождение по параметрам решетки, высокую теплопроводность и изолирующие свойства. Исследования показывают, что для повышения предельных частот следует применять более тонкие гетероструктуры, допустимая толщина барьера которых резко повышается при повышении граничной частоты [4].

Приборы, изготовленные по GaN-технологии, являются устойчивыми к структурным повреждениям. Дозовые эффекты в нитрид галиевых структурах начинают проявляться при достаточно высоких уровнях, потому что в первую очередь они проявляются в диэлектрических слоях приборных структур, и лишь при очень высоких уровнях воздействия становится существенным вклад различных физических эффектов, являющихся причиной перестройки зарядовых состояний в активных областях приборов. Эффекты мощности дозы проявляются в GaN транзисторах в значительно меньшей степени в сравнении с кремниевыми, кремний-германиевыми и арсенид-галлиевыми приборами, из-за более широкой запрещенной зоны – 3,4 эВ. Отсутствие паразитных четырехслойных структур принципиально исключает возможность активации тиристорного эффекта. Катастрофических отказов в GaN транзисторах при воздействии тяжелых заряженных космического пространства с линейными потерями энергии до 80 МэВ·см²/мг частиц не проявляется [5]. В [6-10] представлены способы и методы оптимизации конструкции гетероструктуры и HEMT, направленные на снижение шумовой температуры приборов на основе AlGaIn/GaN.

Постановка задачи

Опыт работы с охлаждением кристалла GaAs HEMT до криогенных температур показал, что вымораживание фононов и уменьшение сечения «двумерного электронного газа» в полупроводниковых структурах на базе арсенида галлия приводит к росту внутренней крутизны активного элемента, уменьшению паразитных активных и реактивных сопротивлений. Указанные изменения влекут за собой не только снижение коэффициента шума и увеличение коэффициента усиления транзистора, но приводят так же к уменьшению полосы согласования и снижению коэффициента устойчивости, что было необходимо учитывать при проектировании охлаждаемых усилителей, поскольку оптимальные цепи согласования транзистора при криогенных температурах, как правило, не совпадают с оптимальными цепями согласования при нормальных условиях, и наоборот [11]. Именно поэтому было принято решение об исследовании поведения GaN HEMT при криогенных температурах.

Работа по исследованию возможности использования малошумящих устройств на основе нитрида галлия для применения при криогенных температурах проводилась на дискретных GaN HEMT производства АО «НПП «Пульсар» и ГИС на их основе в сантиметровом диапазоне длин волн.

Результаты исследований

На начальных этапах работы нужно было определить устойчивость GaN HEMT при криогенных температурах и при изменении температур: устойчивость, характер изменения шумовой температуры и коэффициента усиления, влияние режимов питания и т.п. Для исследования был выбран транзистор производства АО «НПП «Пульсар» с $W_g = 150$ мкм. Внешний вид тестового транзистора представлен на рис.1.

Рис. 1 Внешний вид тестового транзистора

Блок-схема криогенной измерительной установки представлены на рис.2. Замкнутая система охлаждения позволяет достигать температуры основания $T = 22\text{ K}$. Измерения проводились в измерительной оснастке с установленными на входе и выходе ферритовыми вентилями ФПВН-381.

На первом этапе для оценки работоспособности транзистора при криогенных температурах измерялись ВАХ транзистора при различных температурах среды. Вольтамперная характеристика при температурах от 90 до 300 K представлена на рис.3.

Рис.2. Блок-схема криогенной измерительной установки

Рис. 3 ВАХ тестового транзистора в диапазоне температур

Анализ ВАХ показывает, что при малых напряжениях на стоке ток стока возрастает незначительно с понижением температуры основания, а при высоких напряжениях – изменение становится значительным и при напряжении сток-исток $U_{DS} > 15$ В ток стока I_{DS} возрастает в 3 раза при перепаде температур $\Delta T = 210$ К. Это связано с увеличением подвижности носителей заряда в канале, вызванной деактивацией глубоких уровней при понижении температуры.

На следующем этапе проводились измерения коэффициента усиления и коэффициента шума транзистора при напряжении на стоке $U_{DS} = 8$ В, поскольку при более высоких напряжениях наблюдается значительный рост тока в зависимости от температуры. В целях обеспечения устойчивости измерений и обеспечения постоянства эквивалентных импедансов генератора и нагрузки на зажимах транзистора внешними согласующими цепями произведено согласование в полосе $\Delta F = 9,0 \dots 10$, ГГц. Результаты измерений представлены на Рис.4,5.

Рис.4 Измеренные значения коэффициента усиления GaN HEMT

Рис. 5 Измеренные значения коэффициента шума GaN HEMT

Из представленных зависимостей видно, что с понижением температуры коэффициент усиления увеличивается на 3 дБ, а коэффициент шума уменьшается на 2 дБ при температуре корпуса близкой к $T_k = 26$ К.

Важно отметить, что при охлаждении/нагревании не наблюдается сбоев и самовозбуждения транзистора. Следовательно, использование нитрид-галлиевых технологий возможно для создания эффективного высоконадежного малошумящего криоМШУ для использования как в составе радиоаппаратуры космического базирования, где возможны большие перепады температуры окружающей среды, так и в составе наземных станций радиоастрономических наблюдений и связи, использующих системы криоохлаждения для повышения чувствительности у приемных трактов.

Выводы

Установлено, что малошумящие GaN HEMT устойчиво работоспособны при отрицательных температурах, вплоть до 20 К, при этом существенное снижение шумовой температуры показывает, что происходит «идеализация» двумерного электронного газа, связанная с регуляризацией границ между слоями гетероструктуры AlGaIn/GaN.

Проведенные исследования подтверждают возможность создания малошумящей нитридгаллиевой электронной компонентной базы с низкими уровнями собственных шумов и стабильностью параметров для применения в условиях криогенных температур, что обеспечивает её применение в составе приемных устройств радиоэлектронных систем космического базирования и криоохлаждаемых радиоастрономических систем.

1. Груздов В.В., Колковский Ю.В. Приемо-передающие нитрид-галлиевые СВЧ модули для РЛС // Вопросы радиоэлектроники. 2015. № 5. С. 163-174.
2. Васильев А.Г., Колковский Ю.В., Корнеев С.В., Дорофеев А.А., Миннебаев В.М. SiGe и GaN СВЧ приборы для приемопередающих и передающих модулей // Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы. 2009. № 2 (223). С. 5-10.
3. Abolduyev I.M., Zubkov A.M., Minnebaev V.M. X-Band Amplifier for Active Phased-Array Antennas // Proceedings of the 1998 3rd International Conference on Satellite Communications, ICSC98. Part 1 (of 3). Moscow, Russia, 1998. С. 170-171, DOI: 10.1109/ICSC.1998.741405
4. Mamadi R., Faez R. Influence of Aluminum Concentration of Barrier on Noise Characteristics of Al_{0.3}Ga_{0.7}N/Al_{0.05}Ga_{0.95}N/GaN HEMTs // 5th SASTech 2011, Khavaran Higher-education Institute, Mashhad, Iran, May 12-14
5. Чуков Г.В., Амбуркин Д.М., Елесин В.В., Миннебаев В.М., Будяков А.С., Савченко Е.М., Телец А.В. Эффекты мощности дозы в транзисторах на нитриде галлия // В сборнике: Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА. Материалы XIII научно-технической конференции. 2014. С. 268-270.

6. Миннебаев С.В., Филатов А.Л., Краснов В.В. Малошумящий транзистор с составным каналом на основе гетероструктур AlGa_N/Ga_N // Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы. 2017. № 4 (247). С. 21-27.
 7. Lee J.-W., Kuliev A., Kumar V., Schwindt R., and Adesida I. Microwave noise characteristics of AlGa_N/Ga_N HEMT's on SiC Substrates for broadband low-noise amplifiers // IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., vol. 14, no. 6, pp. 259-261, Jun. 2004
 8. Аболдуев И.М., Краснов В.В., Миннебаев С.В., Филатов А.Л. Проектирование Ga_N HEMT для приемных устройств // Наноиндустрия. 2018. № S (82). С. 459-463, DOI: 10.22184/1993-8578.2018.82.459.463
 9. Grishakov K.S., Elesin V.F., Ryzhuk R.V., Kargin N.I., Minnebaev S.V. Effect of Diamond and Graphene Heat Spreaders on Characteristics of AlGa_N/Ga_N HEMT // Physics Procedia. 2015. pp. 460-464, DOI: 10.1016/j.phpro.2015.09.093
 10. Mamadi R., Faez R., Behtoei B. Influence of Physical Parameters on Microwave Noise Characteristics of Al_{0,3}Ga_{0,7}N/Al_{0,05}Ga_{0,95}N/Ga_N Composite-Channel HEMTs // International Journal of Applied Physics and Mathematics, vol. 2, no. 6, November 2012, pp. 442-445.
 11. V.V. Krasnov, V.M. Minnebaev Coolable Ka-Band LNA for RT-22 PRAO ACC FIAN // Proc. of 16th International Crimean Conf. Microwave and Telecommunication Technology, 2006, Vol. 1, pp. 121 – 122, DOI: 10.1109/CRMICO.2006.256325
-