

GaN-МИКРОСХЕМЫ ПРЕТЕНДУЮТ НА ЗАМЕНУ ЭВП КОНКУРЕНЦИЯ ОБОСТРЕАЕТСЯ

И.Викулов i_k_vikulov@mail.ru

Не первый год идет полемика о том, какому классу СВЧ-электронных приборов следует отдать предпочтение при разработке перспективных радиоэлектронных систем – электровакуумным (ЭВП) или полупроводниковым. Особую остроту этой дискуссии придает развитие технологии нитрида галлия (GaN) в качестве нового материала полупроводниковой электроники. Некоторые компании, сделавшие ставку на GaN, стали агрессивно рекламировать свою продукцию, типа: Goodbye, Tube! (Прощайте, ЭВП!), Hello, GaN! (Привет, GaN!). И надо сказать, что основания для этого есть. Полученные к настоящему времени значения мощности отдельных GaN-транзисторов и усилителей в некоторых диапазонах частот достигают сотен ватт. Но готовы ли GaN-приборы заменить ЭВП в наиболее ответственных применениях, включая системы радиовооружения? Ведь развитие ЭВП пока не прекратилось. Около полутора-двух десятков компаний в мире сохраняют вакуумное производство, разрабатывают устройства миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн, включая терагерцовый диапазон. Но и нитрид галлия быстрыми темпами укрепляет свои позиции.

МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ США ДАЕТ ДОБРО ПРОИЗВОДСТВУ GaN-МИКРОСХЕМ

Несмотря на достаточно хорошие параметры GaN-микросхем (МИС), полученные в ходе выполнения американской программы развития приборов на широкозонных полупроводниках WBGs-RF [1], считалось, что они слишком дороги, ненадежны и требуют длительной разработки. В 2007 году Министерство обороны (МО) США

начало финансирование отдельной программы Title III. Цель ее – создание материально-технической и производственной базы для выпуска надежных, недорогих монолитных интегральных схем (МИС) мощных СВЧ GaN-усилителей для радиоэлектронных систем вооружения. Ответственность за программу в целом МО возложило на ВВС США. Непосредственное руководство участвующими в программе промышленными компаниями

осуществляет производственно-технологическое отделение исследовательской лаборатории ВВС США AFRL. В ходе выполнения программы специалистами МО выработана новая методика оценки технического уровня готовности микроэлектронного производства [2]. В основу методики положен закон о военном производстве (Defense Production Act Title III) от 1950 года, устанавливающий принципы государственной политики в области создания новых технологий и организации промышленного производства в интересах национальной обороны. По словам представителей МО, с 1990-х годов начался сильный рост стоимости и сроков поставок важнейших систем вооружения. Для исправления положения в конце 2008 года была выпущена новая Инструкция 5000.02 по организации системы оборонных закупок (Operation of the Defense Acquisition System), согласно которой была введена шкала уровней готовности производства (Manufacturing Readiness Levels, MRL). Шкала включает десять уровней. Последний означает готовность к крупносерийному экономичному производству, девятый уровень подтверждает готовность мелкосерийного производства перейти к крупносерийному. Уровень 8 говорит о наличии пилотной производственной линии, позволяющей приступить к мелкосерийному выпуску изделий. Задача программы Title III – вывести технологию мощных МИС СВЧ GaN-усилителей на уровень 8, достаточный для начала внедрения новой технологии в производство систем вооружения МО.

В рамках программы выполняются четыре проекта, три из которых предусматривают развитие производства GaN МИС. Четвертый, специальный проект, проводимый компанией Raytheon, направлен на разработку технологии конформного покрытия структур GaAs МИС, защищающего их от неблагоприятного воздействия окружающей среды [3]. Решение этой задачи позволит исключить из технологии GaAs МИС корпусирование, приводящее к увеличению размеров, массы и стоимости МИС, а также ограничивающее технологию формирования межсоединений. К конформному покрытию предъявляются требования минимального воздействия на СВЧ-параметры и надежность входящих в МИС транзисторов. Ожидается, что в дальнейшем применение конформного покрытия может заметно повысить стабильность технологического процесса производства МИС.

Участники программы Title III в части GaN МИС – компании Raytheon, Cree и TriQuint. Рассмотрим особенности разработок каждой компании.

Компания Raytheon начала работы по программе в конце 2009 года. Разработка велась на ее предприятии в Андовере (штат Массачусетс) совместно с инженерами AFRL. Предприятие располагает чистыми комнатами класса 100 площадью 2137 м². На нем работают 30 научных сотрудников и 100 инженеров различных специальностей (приборостроение, схемотехника и построение модулей), а также многочисленный производственный персонал.

За три с лишним года обработано более 250 GaN-приборов на SiC-пластинах диаметром 100 мм с целью освоения экономически эффективного производства СВЧ МИС X-диапазона на напряжение 28 В [3]. Работа выполнялась в три этапа. В течение первых девяти месяцев с помощью базового процесса MLR7 было обработано 24 пластины с использованием набора шаблонов, применяемых при изготовлении как собственных, так и опытных заказных микросхем, полевых транзисторов и небольших МИС (для оценки надежности), а также МИС с большой периферией (для оценки выхода годных). Выход годных усилителей с большой периферией был приемлем, но все же ниже, чем для GaAs МИС сравнимого размера. Аналогично и результаты испытаний на надежность (методом Аррениуса на постоянном токе при трех значениях температуры) в основном соответствовали требованиям MRL8 по средней наработке на отказ (МТТФ). Однако небольшая часть испытываемых приборов деградировала при повышенных температурах.

Второй этап был направлен на выявление основных недостатков базового процесса. Для этого было проведено большое число экспериментов на 150 пластинах. Отработка и устранение каждого выявленного недостатка производились минимум на 24 пластинах. Вначале был повышен выход годных конденсаторов и улучшен процесс изготовления затвора. Это сразу снизило раннюю деградацию приборов, наблюдаемую при оценке надежности при высоких температурах. На ранней стадии процесса был также проведен строгий отбор микросхем по постоянному току и СВЧ, что позволило улучшить выход годных и надежность приборов. На этом этапе работы выход годных на уровне пластин фактически снизился, зато предсказуемость результатов по надежности и выходу годных при сборке МИС сильно возросла.

Заключительный этап предусматривал более строгое тестирование на пластине. На этом этапе проводились расширенные испытания по СВЧ в непрерывном режиме семи МИС X-диапазона

в течение 5000 ч, не вызвавшие каких-либо изменений мощности МИС. Были обработаны 24 пластины с использованием масок хорошо освоенного производственного процесса. К концу проекта выход годных GaN МИС повысился более чем втрое, до уровня, сравнимого с GaAs-процессом. В результате стоимость одного ватта мощности GaN МИС оказалась в три раза ниже, чем GaAs МИС, даже с учетом стоимости SiC-подложки.

В ходе выполнения программы в течение более трех лет непрерывно анализировались данные по надежности процесса, показавшие, что среднее время наработки на отказ при температуре канала транзисторов 150°C превысило заданное по ТЗ значение 10^6 ч более чем в 1000 раз, и даже время до отказа 1% изделий превысило 10^7 ч. Таким образом, Raytheon стала первой американской компанией, которая выполнила задание программы Title III и квалифицировала технологический процесс производства GaN МИС усилителей мощности X-диапазона по уровню военного стандарта готовности MRL8. В процессе разработки инженеры компании Raytheon усовершенствовали компьютерную модель GaN МИС, учитывающую температуру и вариации технологического процесса и позволяющую выполнять расчет МИС с первой попытки. В результате создан самый полный пакет программ проектирования GaN МИС.

Компания Cree также выполняла свою часть программы Title в три этапа: анализ исходного базового процесса, улучшение этого процесса и окончательная оценка и реализация целевых программных параметров – надежности технологии, выхода годных, стоимости изделий и времени производственного цикла [4]. Исследования проводились на двух типах МИС: схемах S-диапазона с выходной мощностью 75 Вт (процесс G28V3, длина затвора транзисторов 0,4 мкм, напряжение 28 В) и схемах для систем радиопротиводействия X/K_u-диапазона с выходной мощностью 25 Вт (процесс G28V4, длина затвора 0,25 мкм, напряжение 28 В). Компания использовала две модификации этих процессов для изготовления МИС на диапазон частот X/K_u и напряжение 50 и 40 В (G50V3 и G40V4 соответственно). Процесс G50V3 обеспечивал в два раза большую плотность мощности МИС и подходил для изготовления компонентов мощных РЛС и недорогих устройств связи. Назначение второго процесса – создание приборов для РЛС X-диапазона, передатчиков помех систем РЭБ и систем спутниковой связи. Одна из главных задач компании – реализация доступного для промышленности контрактного

производства МИС, демонстрирующего все достоинства GaN-технологии.

МИС компании Cree выполнены на основе транзисторов с высокой подвижностью электронов (НЕМТ), формируемых путем последовательного нанесения на полуизолирующую 4H-SiC-подложку толщиной 0,1 мкм и диаметром 100 мкм методом химического осаждения из паров металлоорганических соединений (MOCVD) трех эпитаксиальных слоев нитридных соединений: нижнего буферного GaN-слоя и двух верхних AlN- и AlGaIn-слоев (рис.1). Поверхностное сопротивление канала структуры равно 335 Ом/□. В МИС использованы микрополосковые линии и стандартные пассивные элементы: металлические мостики поверх диэлектрика, МИМ-конденсаторы (с максимальным напряжением 100 В), тонкопленочные резисторы, сквозные отверстия в подложке.

Структура Ni/Pt/Au-затворов одинакова для процессов V3 и V4. Затвор длиной 0,4 мкм по процессу V3 выполнялся с помощью стандартной оптической литографии и одного этапа травления пассивирующего слоя SiN. При формировании 0,25-мкм затвора в процессе V4 использовался боковой разделитель, позволяющий уменьшить длину затвора. Полевой электрод истока транзистора позволяет повысить усиление и плотность СВЧ-мощности, уменьшить максимальные значения электрических полей прибора, вследствие чего улучшается надежность и снижается емкостная обратная связь. Для получения заданного частотного диапазона прибора проводилась оптимизация толщины пассивирующей диэлектрической пленки и структуры полевых электродов. Напряжение пробоя НЕМТ с оптимизированной структурой, выполненной с помощью процессов V3 и V4, при плотности тока 1 мА/мм превышало 120 В.

МИС S-диапазона, изготовленные по технологии V3, представляют собой двухкаскадные усилители на напряжение 28 В и полосу частот 26%,

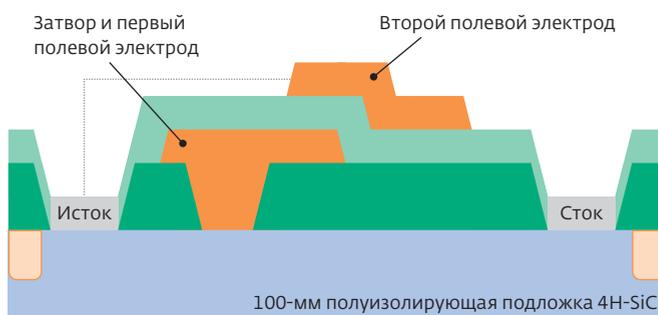


Рис.1. Структура AlGaIn/AlN/GaN НЕМТ компании Cree

размещаемые на кристалле площадью 22,57 мм². Микросхемы РЭБ диапазона (созданные по процессу V4) – это трехкаскадные усилители на напряжение 28 В с полосой частот 100%, занимающие площадь 28,43 мм². Комплект шаблонов для каждого типа схем содержал шаблоны для формирования стандартных контрольных элементов, перекрестных передающих линий, МИМ-конденсаторов и металлических контактных площадок. Испытания на надежность проводились методом Аррениуса в условиях непрерывной работы при температуре нижней поверхности кристалла с МИС 125°С (эквивалентно максимальной температуре перехода 225°С).

Для обоих процессов результаты превысили задания программы: среднее время наработки на отказ составило 10⁶ ч при отказе 50% приборов и 10⁵ ч при 1%-м отказе. В течение первого года программы процесс G28V3 был аттестован по уровню готовности MRL8, процесс G28V4 – по уровню MRL7. Сейчас компания продолжает отработку технологических процессов с целью достижения 8 тыс. ч непрерывной работы в СВЧ-режиме. Ожидается, что окончательная оценка отработанности процессов будет проведена двумя независимыми заказчиками. Изучается также возможность разработки процесса V5, который позволит с помощью оптической литографии изготавливать более высокочастотные (на 26,5–40 ГГц) МИС с длиной затвора 0,15 мкм.

Компания TriQuint, участвующая в программе с 2010 года, так же как компания Cree, разрабатывала технологию создания мощных GaN МИС S-диапазона (двухкаскадный усилитель мощности с высоким КПД) и широкополосных МИС усилителей мощности X/K_u-диапазона на полуизолирующих 6H- и 4H-SiC-подложках [5]. МИС компании выполняются на основе НЕМТ, изготовленных на эпитаксиальных слоях, выращенных с помощью MOCVD-метода. Затворы транзисторов длиной 0,25 мкм и интегрированные с ними полевые электроды создаются с помощью электронно-лучевой литографии. В структуре используется и второй полевой электрод, соединенный с истоком, который позволяет уменьшить деградацию транзисторов при больших электрических полях. Расстояние от истока до второго электрода устанавливается так, чтобы повысить КПД и усиление при высоких напряжениях.

В соответствии с требованиями программы компания должна была развернуть производственную линию (уровня MRL8), готовую к мелкосерийному

выпуску МИС указанных диапазонов, а также создать экономически эффективное контрактное производство, способное поставлять на рынок узкополосные и широкополосные МИС на основе GaN-эпитаксиальных структур на SiC-подложках диаметром 100 мм.

В ходе работы компании было исследовано множество факторов, влияющих на качество и надежность технологического процесса. Так, была установлена причина разброса значений емкости нитридных конденсаторов от пластины к пластине. Проблема была устранена за счет корректировки одного из этапов процесса изготовления конденсаторов.

Различное качество SiC-подложек – одна из возможных причин разброса параметров приборов, в том числе и тока утечки затвора. Установки оптического обследования недостаточно эффективны для контроля этого показателя. Поэтому TriQuint приобрела специализированную высокоточную установку Candela. Отдельная методика была разработана для оценки эффекта коллапса тока. Сейчас TriQuint работает над сокращением времени производственного цикла путем избавления от избыточного оборудования и ввода автоматизированных установок. Один из возможных шагов в этом направлении – введение в процесс оптической литографии.

Испытания приборов на надежность включали тестирование отдельных транзисторов, однокаскадных стандартных схем и МИС обоих диапазонов. При испытаниях на СВЧ регистрировались значения входной и выходной мощности, напряжений и токов стока и затвора, а также температуры базовой платы. Испытания проводились в течение 1000 ч. Достигнутое значение MTTF превышает 10⁷ ч при температуре канала транзисторов 200°С и более 10⁶ ч при температуре 225°С. В настоящее время компания освоила выпуск транзисторов и МИС более высокочастотных диапазонов, изготавливаемых по 0,15-мкм технологии.

По сообщениям, в ближайшее время к разработке GaN МИС по программе Title III присоединится компания Northrop Grumman [6], благодаря чему будет образована так называемая "большая четверка", на которую еще по программе WBCS-RF возлагалась основная ответственность за перевод радиоэлектронных систем управления вооружением с GaAs-компонентной базы на базу GaN. Контролирующие выполнение программы Title III представители МО отмечают слаженное взаимодействие со всеми ее участниками.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ GaN РАСШИРЯЮТСЯ

Конечно, основной локомотив развития GaN СВЧ-технологии – по-прежнему военные применения. Согласно прогнозам аналитической компании Strategy Analytics [7], рынок GaN-микронэлектроники, который в 2012 году оценивался в 100 млн. долл., к 2017 году достигнет 300 млн. долл. Активно формируются и секторы коммерческих приборов для кабельного телевидения, инфраструктуры беспроводной связи и др. Но более 50% GaN-рынка в 2017 году придется на долю устройств для военной техники. По данным компании Стее, для армии США в Ираке и Афганистане она уже поставила более 300 тыс. мощных многокаскадных GaN МИС, выполненных по технологии G28V3. МИС использовались в аппаратуре обезвреживания самодельных взрывных радиоуправляемых устройств [6].

Наиболее широкие перспективы для GaN МИС открывает разработка нового поколения приемопередающих модулей (ППМ) для РЛС с АФАР. Они могут применяться как в мощных выходных каскадах ППМ, так и в приемной цепочке в качестве ограничителей и маломощных усилителей. Высокая мощность, излучаемая каждым GaN-элементом АФАР, позволяет увеличить дальность РЛС. При этом стоимость одного ватта излучаемой мощности может быть меньше, чем у ППМ на основе GaAs МИС. Число разрабатываемых и проходящих испытания РЛС с АФАР на GaN-модулях продолжает расти. Это и четырехкоординатная корабельная РЛС С-диапазона (компания Cassidian), и корабельная станция ПВО/ПРО AMDR-S (Raytheon), и трехмерная наземная станция обнаружения, идентификации и сопровождения С-диапазона ZDELRR, предназначенная для замены устаревшей TPS-75 (Raytheon по заказу ВВС США). Все указанные станции работают в относительно низкочастотных S- и С-диапазонах. Сообщений об использовании GaN-модулей в АФАР X-диапазона пока не было. Правда, появились сведения о возможности комплектования GaN-микросхемами крупнейшей РЛС с АФАР X-диапазона морского базирования, располагаемой на плавучей платформе и предназначенной для обнаружения головок баллистических ракет на фоне помех [6]. Компания Raytheon недавно объявила о заключении контракта с ВМС США на разработку по программе "Система радиопротиводействия следующего поколения" (Next Generation Jammer, NGJ) аппаратуры на основе GaN МИС, которая сможет заменить

систему ALQ-99 на вакуумных лампах, установленную на тактическом самолете радиоподавления EA-18G Glower. Судя по назначению новой системы РПД, можно предположить, что она будет охватывать и X-диапазон. Для МИС, работающих на таких частотах, Raytheon недавно продемонстрировала уровень готовности MRL8 промышленной GaN МИС-технологии.

Наряду с наземными, надводными и авиационными АФАР, большие возможности для замены электровакуумных приборов нитрид-галлиевыми предоставляет ракетная техника, где в передатчиках активных головок самонаведения (ГСН) обычно используются ЛБВ (США) или клистроны (Китай и др.). В начале 2008 года компания Raytheon, выпускающая различные типы ракет (AMRAAM, Tomahawk и др.), показала возможность построения недорогой АФАР для ГСН диапазона 35 ГГц с приемопередающими модулями на основе GaAs. Образец АФАР содержал 600 модулей мощностью 40 мВт каждый [8].

Как отмечают эксперты компании Strategy Analytics, с развитием технологий АФАР и GaN тенденция вытеснения СВЧ-электровакуумных приборов из систем радиолокации становится все заметней. Увеличивается и число предложений по замене ЭВП GaN-приборами в коммерческих системах. Канадская компания Advantech Wireless, специализирующаяся в области создания наземной аппаратуры спутниковой связи, выпускает для средств прямого спутникового телевидения ряд усилительных GaN-блоков, совмещающих усилители мощности и повышающие конвертеры. Мощность одной из последних моделей компании серии Sapphire Series составляет 2500 Вт в K_u -диапазоне. Усилитель характеризуется сверхвысокой линейностью, позволяет максимально использовать полосу частот спутника и может работать со многими несущими. Экономия энергии по сравнению с клистрономы и ЛБВ составляет от 8 до 16 дБ.

Мощные GaN-усилители представляют также серьезную конкуренцию ЛБВ, применяемых в передатчиках спутниковых систем. Компания Boeing, которой принадлежат более ста работающих на орбите спутников, привела результаты исследования работы бортовых усилителей на ЛБВ и GaN-усилителей. Было показано, что по интенсивности отказов они сопоставимы, а по таким параметрам, как габариты/масса, полоса частот и стоимость/срок изготовления, GaN-усилители имеют преимущество [9].