

ПРОГРАММА WBGS-RF. ФАЗА II ИТОГИ И НАМЕРЕНИЯ

Программа широкозонных полупроводников для СВЧ-применений WBGS-RF стала одной из крупнейших финансируемых Управлением перспективных разработок Министерства обороны США (DARPA) после известной программы MIMIC середины 1990-х годов [1,2]. Цель программы WBGS-RF – создание воспроизводимых надежных GaN-на-SiC транзисторов и монолитных интегральных схем (МИС), обеспечивающих высокие характеристики систем вооружения, в том числе систем радиолокации, связи и РЭБ [3]. Собственно говоря, цель программы MIMIC была точно такой же. Однако тогда речь шла о переводе всех систем радиовооружения с гибридной системотехники на монолитную, а в качестве базового полупроводникового материала рассматривался GaAs. Благодаря свойствам нитрида галлия усилители на основе GaN-на-SiC транзисторов имеют более высокие плотность мощности, КПД и выходную мощность, чем усилители на GaAs-транзисторах. Их тепловые характеристики также лучше благодаря более высокой теплопроводности SiC-подложек. Программа WBGS-RF направлена на замену мощных GaAs-транзисторов и МИС в радиосистемах их GaN-аналогами. Таким образом, речь идет о второй качественной модернизации американских систем радиооружия, основанной на быстро прогрессирующей полупроводниковой технологии. Программа WBGS-RF состоит из трех фаз. В ходе первой фазы (2002–2004 годы) были отработаны процесс эпитаксии AlGaIn/GaN и качество SiC-подложек. Недавно законченная вторая фаза (2005–2008 годы) была направлена на увеличение срока службы и отработку процессов производства высокочастотных GaN-на-SiC транзисторов. Третью фазу программы планируется закончить к концу 2010 года. Рассмотрим основные направления и результаты разработок, проведенных в ходе выполнения фазы II программы WBGS-RF.

И. Викулов, к.т.н.,
член Европейской СВЧ-ассоциации

НАПРАВЛЕНИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ

Зоны ответственности компаний-участников программы WBGS-RF были разделены в соответствии с основными типами систем радиоэлектронного вооружения. Радиолокационное направление взяла на себя группа компаний Raytheon/Cree. В ее задачи входила разработка транзисторов типа HEMT и МИС X-диапазона, а также приемо-передающих модулей экспериментальной радиолокационной субрешетки. Направление РЭБ поддерживала команда во главе с компанией TriQuint. Во второй фазе программы эта группа также разрабатывала HEMT, но с ориентацией на конечную цель третьей фазы программы – создание широкополосных МИС с полосой частот более октавы. В задачи команды компании Northrop Grumman, разрабатывающей приборы для средств связи, входило создание транзисторов на значительно более высокие диапазоны частот (~40 ГГц), что наложило целый ряд ограничений на конструкцию HEMT. Все участники фазы II добились увеличения срока службы созданных транзисторов до нескольких тысяч часов при температуре перехода прибора 150°C.

Сегодня GaN HEMT по надежности приблизились к HEMT на GaAs и InP. Когда в 2005 году начиналась фаза II, уже было много сообщений о том, что различным организациям удалось получить высокие параметры GaN HEMT. Однако параметры многих из этих приборов, особенно работающих при очень высоких плотностях мощности, со временем быстро деградировали. Процент выхода таких транзисторов был очень мал. Поэтому главная цель второй фазы программы WBGS-RF состояла в достижении фундаментального понимания конструктивно-технологических особенностей GaN-транзисторов с тем, чтобы определить и исключить факторы, вызывающие деградацию их параметров. Длительное экспериментирование и моделирование на физических моделях, проведенное каждой из команд-участников фазы II, привело к созданию стабильных HEMT с высокой плотностью мощности. Так, были продемонстрированы HEMT X-диапазона с плотностью мощности, превышающей 6,4 Вт/мм, и средним временем наработки до отказа (MTTF) свыше 10^6 ч при температуре перехода 150°C.



В ходе выполнения программы экспериментальные данные, полученные исполнителями, регулярно подтверждались экспертной правительственной комиссией, в которую входили представители всех трех видов вооруженных сил США – исследовательских лабораторий ВВС, ВМС и Армии США (Air Force Research Laboratory, Naval Research Laboratory, Army Research Laboratory), а также инженеры и ученые Министерства обороны США. Комиссия проводила независимую экспертизу и оценку представленных приборов, изготовленных на более чем 500 пластинах. Каждая из пластин имела стандартный набор контрольных элементов, позволяющих представителям комиссии контролировать процесс разработки и сравнивать полученные результаты с данными разработчиков. Все контрольные схемы тестировались по параметрам постоянного тока и на СВЧ. Военные представители подтверждали также данные по надежности и участвовали в анализе отказов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВТОРОЙ ФАЗЫ ПРОГРАММЫ WBG5-RF

Все цели, поставленные по фазе II программы, были выполнены или превышены по всем трем направлениям работ. Средние значения СВЧ-параметров, полученные каждой из команд на большом числе приборов, выполненных на нескольких пластинах (сотни приборов по крайней мере из трех пластин), приведены в таблице.

Окончательные базовые конструкции приборов, разработанные по программе, обеспечивают возможность их

последующего производства. Работы каждого участника программы были направлены на решение трех главных задач: получение требуемых по ТЗ СВЧ-характеристик, увеличение срока службы и обеспечение повторяемости параметров приборов.

СВЧ-характеристики. Хотя задачи команд Raytheon и TriQuint во второй фазе программы различались, они обе демонстрировали приборы X-диапазона, работающие при напряжении 40 В. Команда компании Raytheon достигла усредненных по четырем пластинам значений КПД 62,1%, выходной мощности 8,1 Вт и коэффициента усиления 12,1 дБ на транзисторах с шириной затвора 1,25 мм. Компания TriQuint представила приборы с несколько более высокой мощностью (8,5 Вт) и сравнимыми значениями КПД (62 %) и усиления (12,3 дБ), усредненными по пяти пластинам. Несмотря на однотипность конструкции транзисторов, разрабатываемых этими компаниями, они различались, в частности, конструкцией полевого электрода, предназначенного для повышения однородности профиля электрического поля в области затвора. В транзисторах компании Northrop Grumman полевые электроды не применялись, поскольку на частотах Q-диапазона это могло привести к увеличению емкости и ухудшению параметров приборов.

Важным этапом фазы II программы стало исследование влияния технологии и свойств эпитаксиальных слоев на параметры и надежность транзисторов. Значительную помощь в понимании механизма стабильности приборов оказали мо-

Основные результаты фазы II программы WBG5-RF

Характеристики	Компании-участники программы (зоны ответственности)					
	Raytheon/Cree (приборы X-диапазона)		TriQuint (широкополосные устройства)		Northrop Grumman (приборы Q-диапазона)	
	Цель	Результат	Цель	Результат	Цель	Результат
Число приборов (транзисторов), шт.	100	198	100	251	100	300
Число пластин, шт.	3	4	3	5	3	5
Напряжение стока, В	40	40	40	40	28	28
Ширина затвора, мкм	1250	1250	1250	1250	500	500
Рабочая частота, ГГц	8-12	8-12	8-12	8-12	40	40
Выходная мощность ¹⁾ , Вт	7,94	8,1	7,94	8,5	1,58	1,8
КПД, %	60	62,1	60	62	35	36
Коэффициент усиления K_u , дБ	12	12,1	12	12,3	8	8,3
Выход по СВЧ ²⁾ , %	50	91	50	83	50	69
Повторяемость выходной мощности ³⁾ , дБ	1	0,1	1	0,2	1	0,22
Повторяемость КПД ³⁾ , %	3	1,5	3	2,1	3	1,5
Повторяемость K_u на малом сигнале ³⁾ , дБ	1	0,1	1	0,2	1	0,33
Время наработки ⁴⁾ , ч	10^5	10^7	10^5	$1,5 \cdot 10^6$	10^5	$1,9 \cdot 10^9$

¹⁾ Измеряется при компрессии, соответствующей максимальному КПД.

²⁾ Часть приборов из всех годных пластин, удовлетворяющая или превышающая все требования ТЗ.

³⁾ Повторяемость определяется как стандартное отклонение параметра по 100 и более приборам/МИС на всех годных пластинах.

⁴⁾ Отказом считается снижение выходной мощности на 1 дБ.

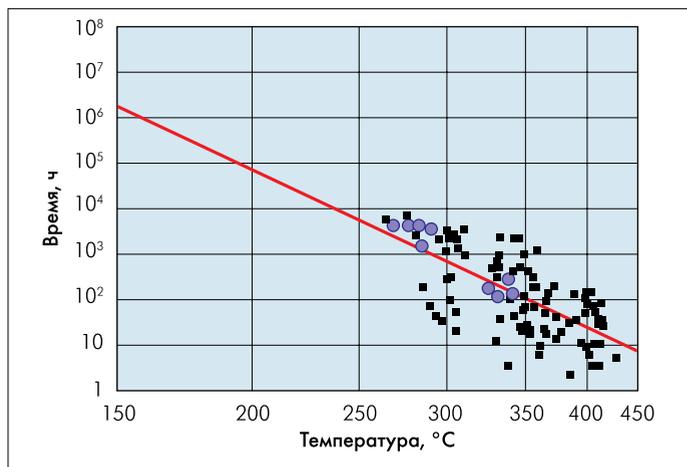


Рис. 1. Прогнозируемое среднее время наработки GaN-транзисторов на отказ, согласно данным компании TriQuint. Испытания проведены при повышенных температурах по постоянному току (■) и СВЧ (●)

дели, разработанные в ходе выполнения программы. Улучшить КПД и коэффициент усиления удалось за счет тщательного проектирования буферного слоя и уменьшения утечки тока затвора. Чтобы сбалансировать требования по плотности мощности и стабильности работы, был проведен анализ влияния примесей в буферном слое, а также влияния деформации и толщины барьера. Кроме того, изучались различные варианты барьерных слоев, служащих для ограничения дрейфа носителей заряда.

Срок службы, стабильность. Значительный прогресс был достигнут в понимании физических механизмов, вызывающих деградацию параметров, и в создании конструкций, исключающих или существенно ослабляющих их влияние. Стабильность и большой прогнозируемый срок службы приборов рассматривались как главные обоснования пригодности нитрида галлия для применения в военной технике, для которой требования к надежности и параметрам гораздо выше, чем для коммерческих систем.

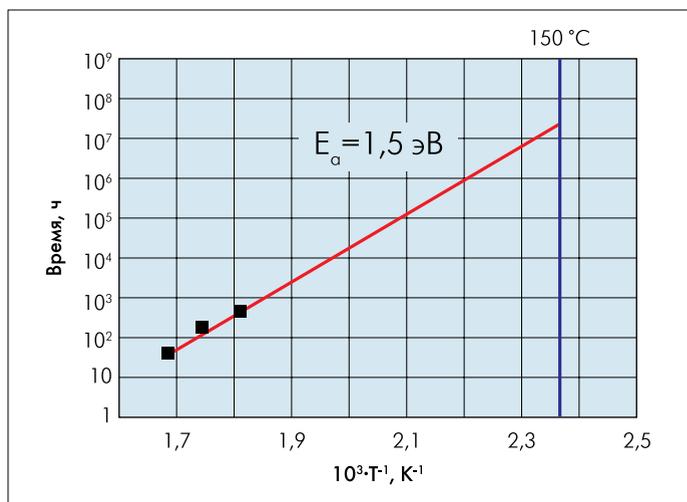


Рис. 2. Прогнозируемое среднее время наработки GaN-транзисторов до отказа, согласно данным компании Raytheon. Испытания по постоянному току проведены при значениях температуры 280, 300 и 320 °C

До начала второй фазы программы срок службы СВЧ GaN HEMT составлял всего несколько часов. Теперь многие приборы X-диапазона и более высоких частот нарабатывают по 1000 ч, а отдельные – до 10000 ч при уменьшении выходной мощности не более чем на 1 дБ. Оценка времени наработки производилась по методу Аррениуса, где ускоряющим фактором служила повышенная температура. Согласно оценкам всех трех участников программы, наработка транзисторов на отказ превышает 10^6 ч при температуре перехода 150°C . На рис.1 приведены данные компании TriQuint, на рис.2 – результаты испытаний по постоянному току, проведенные командой Raytheon.

Увеличение срока службы транзисторов явилось результатом серьезной работы по изучению механизмов их отказов. Так, после того, как были устранены причины образования ловушек в буферной, барьерной и пограничных поверхностных областях, удалось значительно ослабить влияние коллапса тока стока транзисторов. Характер наблюдаемых отказов оказался различным в разные интервалы времени. Так, отказы, возникающие в первые минуты работы транзистора, сильно зависят от условий обработки и, по-видимому, вызваны либо утечкой тока затвора через поверхность полупроводника, либо деградацией барьера Шоттки. Характер деградации, преобладающий в первые часы работы, до сих пор не ясен. При анализе долговременных отказов удалось выявить новые их типы, которые раньше не наблюдались. Так, хотя влияние пика профиля электрического поля под затвором на отказ транзистора было известно, обнаружение изменения кристаллической решетки в слое AlGaIn под краем стока вблизи области затвора привело к новому пониманию характера возможных долговременных отказов. Модели образования дефектов кристаллической решетки вследствие избыточного напряжения, вызванного обратным пьезоэлектрическим эффектом в барьере, подтвердились экспериментальными данными по отказам. Эти модели показали, что для ослабления механизма деградации необходимо удерживать пиковое значение напряженности электрического поля ниже его критического значения.

Повторяемость. Последний комплекс требований, предъявляемых к GaN-транзисторам во второй фазе программы, состоял в том, чтобы высокие технические параметры и большой срок службы транзисторов сочетались с высоким выходом годных изделий в условиях их промышленного производства. Каждая из участвующих в программе команд в течение квартала поставляла оценочной правительственной комиссии по несколько пластин для проверки НЧ- и СВЧ-параметров транзисторов. Преимущественно поставлялись пластины диаметром 75 мм. Большое число пластин позволило также выяснить особенности влияния эпитаксиальных структур на повторяемость па-

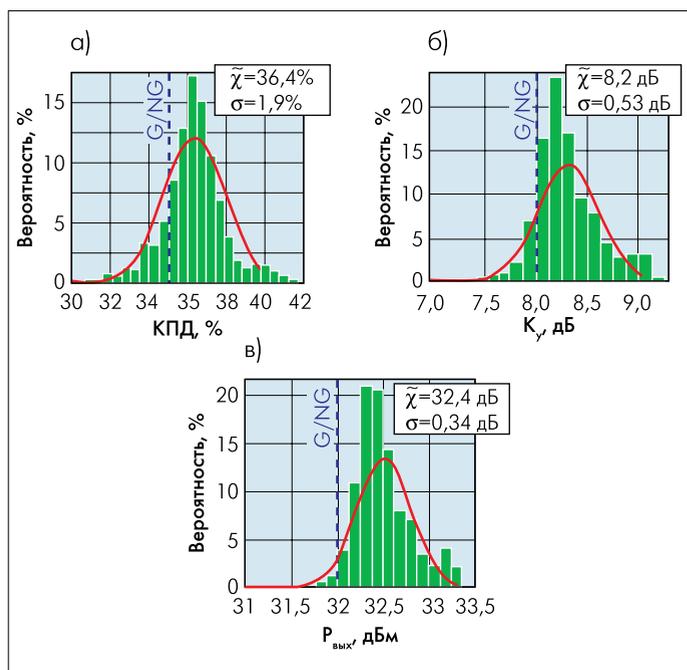


Рис.3. Результаты испытаний компанией Northrop Grumman 1400 GaN-транзисторов, изготовленных на 14 пластинах, на повторяемость КПД (а), коэффициента усиления K_v (б) и выходной мощности $P_{\text{вых}}$ (в). Выход по СВЧ-параметрам, измеренным на частоте 40 ГГц, превышает 68%. Пунктирная прямая указывает значения, заданные ТЗ

раметров транзисторов. Важно было добиться того, чтобы идентичные эпитаксиальные структуры, изготовленные разными компаниями, давали близкие по значению СВЧ-параметры и повторяемость.

За трехлетний период проведения второй фазы программы наблюдался устойчивый прогресс в достижении повторяемости параметров и увеличении выхода годных приборов. На рис.3 показаны средние значения ($\bar{\chi}$) и стандартные отклонения (σ) основных СВЧ-параметров 1400 приборов, изготовленных на 14 пластинах. В дальнейшем для снижения стоимости приборов предполагается использовать подложки большего диаметра. Первые измерения, проведенные на пластинах диаметром 100 мм, показали такую же повторяемость параметров эпитаксиальных структур и СВЧ-параметров, как и у приборов на пластинах диаметром 75 мм.

После успешного окончания второй фазы программы WBGs-RF ее участники приступили к выполнению двухгодичной фазы III, задача которой состоит в разработке надежных СВЧ монолитных интегральных схем, отвечающих конечным техническим требованиям программы. GaN МИС с требуемыми параметрами должны быть созданы к концу 2010 года. Ожидается, что по мощности и КПД они значительно превзойдут используемые сейчас МИС на GaAs. Наряду с созданием микросхем в планы компании Raytheon входит также разработка GaN-приемо-передающих модулей и демонстрация собранной на них опытной радарной субрешетки. Тем самым будет сделан решающий шаг к созданию первых высокоэффективных АФАР широкого назначения на основе GaN-технологии.

Ускорению работ в этом направлении будет способствовать также недавно принятое решение о совместном проведении работ по третьей фазе программы WBGs-RF, финансируемой DARPA, и программе NGT (Next Generation Transmit Receive Integrated Microwave Module), финансируемой Агентством по ПРО (Missile Defense Agency) [4, 5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Викулов И., Кичаева Н. Технология GaAs-монокристаллических схем СВЧ в зарубежной военной технике. – ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес, 2007, №2, с.56–61.
2. Викулов И., Кичаева Н. GaN-технология – новый этап развития СВЧ-микросхем. – ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес, 2007, №4, с.80–85.
3. Rosker M. et al. The DARPA Wide Band Gap Semiconductors for RF Applications (WBGs-RF) Program: Phase II Results. – CS MANTECH Conference Digest, 2009.
4. Raytheon Demonstrates Gallium Nitride Advantages in Radar Components. Microwave Journal, 2008, vol.51, №6, p.48.
5. Microwaves & RF, 2009, vol.48, №4, p.46.